

海洋情報部研究報告

第 41 号

2005 年

平成 17 年 3 月



海上保安庁

Inquiries about this publication may be addressed to:
Ocean Research Laboratory,
Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard,
5-3-1 Tsukiji, Chuo-ku, Tokyo, 104-0045 Japan
E-mail: kenkyu@jodc.go.jp
Older issues: <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/>

日本列島とその周辺海域のブーゲー重力異常 (2004 年版)[†]

植田義夫

Bouguer Gravity anomalies (ver. 2004) of Japanese Island Arcs and its adjacent seas

Yoshio UEDA

Abstract

The Hydrographic and Oceanographic Department of Japan have been conducted marine gravity surveys since 1965. Based on these survey results, precise Bouguer gravity anomaly maps of the Japanese Island arcs and its adjacent seas were compiled by a newly developed terrain correction method (Ueda, 2003). Topographic mesh data with the size of 10" x 10" are used as basic mesh data for the terrain corrections of marine gravity survey data with line spacing about 2 mile or less, and 30" x 30" size mesh data for the marine gravity survey data at a scale of 1/500,000. For interpolations of the depths within a rectangular area defined by the 4 basic mesh data points, a weighted gradient interpolation method was used. Japanese island arcs and its adjacent continental shelf regions are covered by 6 sheets of Lambert's conformal conic projection maps. Besides, the small scale gravity anomaly maps covering whole Japanese islands and its adjacent seas including the Shikoku basin, west Philippine sea, and the northwestern part of the Pacific ocean are also compiled in two sheets.

These gravity maps recover the characteristic features of the gravity anomalies as described hereafter.

(1) In the Tohoku Japan arc, a relative positive Bouguer anomaly zone runs in N-S in parallel to the Japan trench. This positive zone is separated into two zones at about N38°00', E141°40', incoresponding to the seaward extension of the Nanbu-Kitagami geological complex.

(2) In the Suruga bay, contour lines of Bouguer anomalies are deflected northward sharply, which suggests the uplift of the lower crust beneath the Izu peninsula region. The local Bouguer anomaly highs are recognized in the inner region of the Nankai trough, such as in the vicinity of Shiono-Misaki Cape, Muroto-Misaki and Ashizuri-Misaki Cape, and in the southwest of the Tosa Bay. These anomalies may be related with the zonation of the subducting Philippine plate.

(3) Bouguer anomalies over the Okinawa trough show a convex feature reflecting the uplift of the lower crust, however, the maximum Bouguer anomaly value (~160mGal) itself is much less than that of the usual oceanic crust, which indicates the existence of the continental crust beneath the Okinawa trough.

(4) In the Izu-Ogasawara arc, a high Bouguer anomaly zone is recognized in the fore-arc region, which continues southward to the Bouguer anomaly high associated with the Ogasawara ridge. In the northern arc,

[†] Received

海上保安大学校 Maritime Safety Academy, Japan Coast Guard.
yoshio-ueda@kaiho.mlit.go.jp

Bouguer anomalies decrease step-wisely toward the inner arc, showing two sharp gradient zones to the east of the volcanic front. The across-arc boundaries separating the Izu-Ogasawara arc also confirmed, one is the “Torishima-seiho tectonic line” connecting the places around N30°30', E140°30' and N29°40', E139°00' and another is the “Nishinoshima tectonic line” connecting N27°50', E141°00' and N26°, E140°00', respectively.

(5) Bouguer anomalies in the northern part of the Shikoku basin decrease eastward with gentle gradient, and, Free-air anomalies, oppositely, increase eastward. The relative Bouguer anomaly lows are recognized over the Amami Plateau, Daito Ridge, Oki-daito Ridge as well as Kyusyu Palau ridge, which may suggest the existence of the continental crusts beneath these ridges. The Bouguer anomalies associated with basins are as follows; Kikai basin is +320mGal, Kita-Daito basin is 300~370mGal, Minami-Daito basin is 270~330mGal and that of the Philippine basin in the south of the Oki-Daito Ridge is 370~380mGal respectively. These variations reveal the different thickness of the oceanic crusts. In the Philippine basin, The gravity features change drastically at the line connecting the places around N24°, E131° and N21°, E129°, which may imply the tectonic line separating the Philippine basin in eastern and western part.

Key wards: Bouguer gravity anomaly, Free-air gravity anomaly, Japan trench, Japan arc, Suruga trough, Nankai trough, Izu-Ogasawara arc, Okinawa trough, Shikoku basin, Amami Plateau, Daito ridge, Oki-Daito ridge, Kyusyu-Palau ridge, Philippine basin.

日本語要旨

水路部は1965年から海上重力測量を実施しており、本論文はそれらの成果をもとに新しい地形補正方法を用いて求めた日本列島とその周辺海域のブーゲー重力異常図をとりまとめたものである。地形補正にあたっては、2マイル間隔の測線間隔によるデータに関しては10”地形メッシュを、一方、1/50万のスケールの大規模測量の成果については30”地形メッシュを基本メッシュとして、メッシュ自動分割法(植田, 2003)により地形補正を行った。基本メッシュ内部での水深の補間に関しては、各グリッド4点からの勾配補間法を用いた。地形補正したブーゲー重力異常データにもとづき、日本列島とその周辺大陸棚海域及び日本列島南方海域について重力異常図を作成した。今回まとめた重力異常図から、重力異常の分布に関する以下の知見が得られた。

東北日本の前弧域では相対的に正のブーゲー重力異常帯が海溝に並走するが、南部北上体の南縁線の海域への延長部の北緯38°00', 東経141°40'付近で2列に分かれる。駿河湾ではブーゲー重力異常の等値線が駿河トラフ軸部で北側に屈曲してお

り、伊豆側の下部地殻の隆起を示唆する。南海トラフの内側ではブーゲー重力異常の局地的な高異常域が潮岬付近、室戸岬、足摺岬とその周辺、土佐湾の南西部に存在する。これらの異常は南海トラフ沿いの震源のブロック化と関連する可能性がある。沖縄トラフ付近は下部地殻の隆起を示唆する相対的に凸のブーゲー異常をしめすが、そのピーク値そのものは通常の海洋性地殻に伴うブーゲー異常の半分程度しかなく、沖縄トラフ下に、大陸性地殻の存在を示す。伊豆 小笠原弧では小笠原海嶺から連続する高重力異常帯が前弧域にN-S方向に配列する。伊豆 小笠原弧北部では、ブーゲー重力異常が火山フロント側に向かって階段状に減少しており、下部地殻が地溝状の構造を持つことを示唆する。また、弧を南北に分断する2列の構造線が推定された。四国海盆のブーゲー異常は九州 パラオ海嶺側から伊豆 小笠原弧側へ緩やかな減少傾向を示すが、フリーエア異常にはこれとは逆の傾向を示す。このことは、四国海盆の地殻構造が拡大軸を対象とする構造ではなく、東西方向に漸移する構造の存在を示唆する。奄美海台、大東海嶺、沖大東海嶺、及び九州 パ

ラオ海嶺では大陸性地殻の存在を示唆するブーゲー異常の落ち込みが認められる。また、海盆に関しては、喜界海盆で +320mGal, 北大東海盆で 300 ~ 370mGal, 南大東海盆で 270 ~ 330mGal, 及びフィリピン海盆で 370 ~ 380mGal を示し、これらの海盆の地殻構造に違いが推察される。沖大東海嶺以南のフィリピン海盆では北緯 24° 東経 131° と北緯 21° 東経 129° を結ぶラインを境に重力異常の様相が急変しており、この部分がフィリピン海盆を東西に分断する構造線であると推察される。

1 はじめに

日本列島とその周辺海域の地殻構造の研究にとって、重力異常は不可欠な情報である。特に、ブーゲー重力異常図は地形による重力変化を補正しており、直感的に地下構造の特徴を捉えるのに適している。海上におけるブーゲー重力異常に関しては、いままでの測量成果をもとに、観測報告や研究論文による提供とともに、CD 媒体によるデジタルデータの利用も行われている。しかし、従来の地形補正については、測点付近を大まかな 5 面体で近似しており、地形補正の方法にはまだ改良の必要性があった。このような、従来の測点近傍の地形近似を改善する方法として、筆者はメッシュ自動分割法による近似方法を提案した。ここでは、今回の新しい近似方法を用いて作成した日本列島とその周辺海域のブーゲー重力異常図を紹介するとともに、ブーゲー重力異常図から推定される構造上の特徴について述べる。

2 重力データ

(1) 海域の重力データ

日本列島とその周辺海域の海上重力観測は、TSSG 型海上重力計の開発により、1960 年代中頃から実用化された (Tomoda and Kanamori, 1962; Segawa, 1970)。これらの成果は Tomoda and

Fujimoto (1980; 1982), Segawa and Tomoda (1976) などにまとめられている。水路部でも、TSSG 型海上重力計を測量船初代「拓洋」に搭載し、上部マントル計画 (Upper Mantle Project) の一環として日本海大和堆付近での海上重力観測を実施した。この観測は水路部による最初の海上重力観測である (Tokuhiro, A., 1966, 1967)。水路部では、昭和 42 年度から「20 万分の一の大陸棚海の基本図計画」を開始し、地震予知計画への参加とあわせて、日本列島の大陸棚海域での海底地形、地質構造、地磁気、重力の総合的な海洋測量を実施した。昭和 58 年度からは、200 海里管轄海域画定のための「50 万分の一の大陸棚調査」が開始された。海上重力計も測量船の代替時期にあわせて順次 KSS-30 型の重力計を導入することとなり、現在では、KSS-31 型への移行が行われている。この間、測量船の測位方式も、当初のデッカやロラン C から NNSS とロラン C を用いた複合測位システム、さらには、NNSS から GPS への移行、というように、順次測位精度の向上が図られてきた。特に GPS の出現により 1 桁以上海上測位精

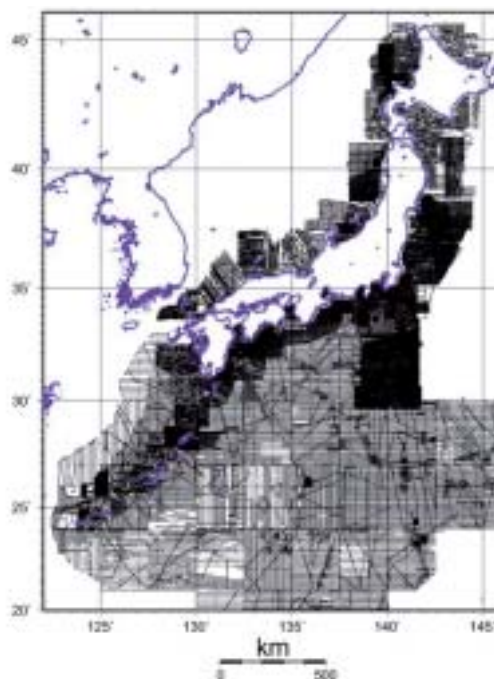


Fig.1 航跡図
Track line chart of marine gravity surveys conducted by Hydrographic and Oceanographic Department, Japan, since 1965.

度が向上したことによるエトベス補正の精度向上により、現在では条件がよければ 0.1mGal の精度での測定も可能となってきている。本論文で用いた海上重力観測の測点図を Fig.1 に示した。これらの観測成果は水路部観測報告や水路部技報に掲載されているほか (Data rept. of Hydrographic Observations ; No.1, 1966 - No.37, 2003 : 水路部技報 No.3, 1985 - No.19, 2001) デジタルデータが日本海洋データセンターからも一部が提供されている。また、これらの研究成果については水路部研究報告などに掲載されている (Ganeko and Koyama, 1981 ; Ganeko and Harada, 1982 ; 植田ほか, 1987 ; 大島ほか, 1988 ; 春日ほか, 1992 ; 春日・林田ほか, 1994 ; Ueda, 1994, 春日・小原, 1997)

(2) 陸域の重力データ

日本列島の陸域の重力異常については河野・古瀬 (1989) による 100 万分のスケールの重力異常図が作成されている。一方、デジタル重力データについては、日本重力 CD-ROM が旧地質調査所により作成刊行されている (地質調査所, 2000)。また、西南日本については Shichi and Yamamoto (part , ; 2001) によりブーゲー異常図とともに用いられたデジタルデータが CD-ROM として提供されている (Gravity research group in southwest Japan, 2001)。今回、これらの陸域部の測量データが利用できるものについては、今回の方法で、陸域部の地形補正計算をおこなった。以上のほか、海洋情報部が伊豆諸島で実施した陸上重力データも、全体からみれば少ないが、ブーゲー重力異常図の作成に用いている。

3 データ処理

3 - 1 地形補正の概要

地形補正の方法については植田 (2003) に詳述しており、ここでは概略並びに、その後の改良した内容を述べる。

地形補正計算ではメッシュ地形データを用いるが、その際のメッシュサイズとしては、陸域部および 20 万分の一の海洋測量データの地形補正には 10 秒メッシュ地形、50 万分の一大陸棚測量データについては一部を除き 30 秒メッシュ地形を用いた。10 秒メッシュは EGG-TOPO データとして提供されているデータで、鈴木ほか (2001) により作成されたものである。30 秒メッシュ地形は今回新たに作成した。使用したデータは大陸棚測量データのほか、Smith and Sandwell (1994) により公開された人工衛星アルチメーターによる 2 分メッシュ地形を用いた。

地形補正は測点を含む基本メッシュ領域を「極近傍」、その基本メッシュの外側を囲むサイズが基本メッシュサイズの 1/2 の 12 個のメッシュを「近傍」とし、また、これらの外側にある領域については観測点との距離が 7.5km 以内を「中間」、それ以遠を「遠方」に区分した。極近傍では、任意の分割数でメッシュを細分化し、地形近似を高めた。近傍メッシュの水深については、基本メッシュおよび周囲のメッシュの水深データと測点の水深から補間により求めた。そのほか、「中間」領域は角柱による重力の解析解、「遠方」では線質量近似による重力効果を計算した。

3 - 2 地形補間法

植田 (2003) では、極近傍の水深補間について距離のべき数の和に反比例する重み付平均補間の方法を用いたが、その後の検討の結果、本方法は地形近似の方法としては必ずしも優れた方法ではないことが確認された。一般に、水深の補間方法としては、先に述べた距離のべき数逆数の重み付平均値から推定する方法以外に、水深の分布を曲面近似で表し、その式から求点の水深を補間する方法、面積補間による方法などがある。後者の面積補間は三角形の内部点でのパラメータの補間方法として有限要素法で広く用いられている。ここでは、上記以外の新たな方法として「重み付勾配補間法」を提示し、各補間方法との比較を行った。

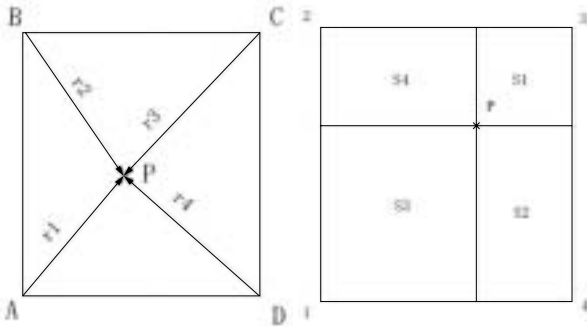


Fig.2 極近傍のグリッド
Schematic map showing the nearest area surrounding the observation point.

Fig.2 で示す単位グリッドについて、その周囲4点の格子点の水深から、グリッド内部のP点での水深を補間することを考えてみる。その場合、既知の水深が既知の点数は4点であるため、曲面近似ではパラメータが3個の1次平面の近似式しか決定することができない。このため、ここでは本法は採用しないこととした。P点における水深値は各補間法では次式で与えられる

(1) 距離のべき乗和の逆数による重み付平均補間法

$$D_p = \frac{\sum_{i=1}^4 D_i \cdot w_i}{w_i}, \quad w_i = \frac{1}{ar^2 + br^3 + c}$$

(2) 面積補間法

$$D_p = \frac{\sum_{i=1}^4 D_i \cdot S_i}{\sum_{i=1}^4 S_i}$$

(3) 重み付勾配補間法

各格子点からテーラー展開により求点Pでの水深値は次式で求められる。

$$D_p(k) = d_k + \frac{\partial d_k}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial d_k}{\partial y} \Delta y + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 d_k}{\partial x^2} \Delta x^2 + 2 \frac{\partial^2 d_k}{\partial x \partial y} \Delta x \Delta y + \frac{\partial^2 d_k}{\partial y^2} \Delta y^2 \right) + \dots$$

ここで、kは各格子点の識別記号である。

ここでは、求点の水深の補間精度は水深の勾配係数の精度に左右される。そこで、各格子点からの距離の逆数を重みとして、 D_p の重み付平均値をとり、それを水深の補間値とする。式で表すと、

$$D_p = \frac{\sum_k D_p(k) \cdot w_k}{\sum_k w_k}, \quad w_k = \frac{1}{a \cdot |r_k| + b r_k^2 + c}$$

実際の計算では、1次までの展開式を用い、重みは $a=1, b=0, c=0.01$ とした。

Fig.3にはそれぞれの方法で補間した場合の水深の等値線をしめした。この結果から、距離のべき乗和の逆数による重み付補間法では、補間した水深と周囲の水深との連続性が滑らかではなく、不自然なコンターとなっていることがわかる。一方、「面積補間法」や「重み付勾配補間法」では、周囲との連続性に不自然さはあまり見られない。「重み付勾配補間法」は計算方法も比較的簡便であり、曲面にも対応できる補間方法であり、ここでは本法を用いることとした。実際の計算では、極近傍内の直下水深が存在する場合には、まず、極近傍のメッシュを直下水深の位置を通る経緯線

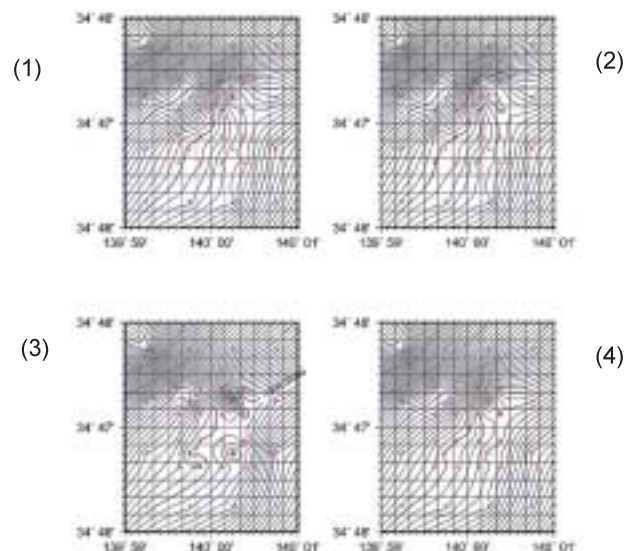


Fig.3 各方法による極近傍水深補間の結果
Comparison of the depth interpolation
(1) aerial interpolation
(2) gradient interpolation
(3) weight of inverse of distance (1/r)
(4) weight of inverse of distance power (1/r²)

で分割し，分割後のサブメッシュ内の補間点での水深を「重み付勾配補間法」で求めている．

4 重力異常図とその定性的解釈

Fig.4 から Fig.10 には，今回の方法で求めた日本周辺海域のブーゲー重力異常図をフリーエア異常図とともに示した．ここで，陸域部分は，主に旧地質調査所による公開デジタル異常値データ（地質調査所，2000）を用いている．また，Fig.11 には，四国海盆とフィリピン海盆を含む広域重力異常図を示した．ここに示したブーゲー重力異常図には，海底地形による効果を差し引いた重力異常が表現されており，海域による海底地下構造の違いが直感的に把握できる．日本列島とその周辺海域については，萩原（1984）による海溝軸に並走する正・負の異常帯の存在が明らかにされたが，今回の異常図からはさらにその詳細が明確にされるとともに，新たな重力異常帯や構造境界が見出された．Fig.12 及び Fig.13 には日本列島周辺海域及び日本南方海域の重力異常に基づく，解釈図で，以下では，各海域の動異常図と本解釈図をもとに各海域の定性的な特徴を概略的に述べることにする．なお，付図（Fig.14 ~ Fig.17）には重力・地形の代表的な断面図を参考として示している．

（1）北海道周辺（Fig.4）千島海溝の内側にブーゲー重力異常の凹部（Fig.12：N1）があり，帯広沖の -100mGal に及ぶブーゲー重力異常の凹部へと連続する．この異常はフリーエア異常も同様な凹部となっており，日高山地の東側で北向きに方向をかえてオホーツクの負異常帯へ連続する．この負異常帯のさらに内陸側には210mgal に達する高ブーゲー異常帯（P1）が存在する．

浦河沖には -140mGal に及ぶブーゲー異常の凹部が認められる．この負異常帯は千島弧の内側の負異常帯（N1）と本来連なるものであるが，日高山地から SE へ延びる正異常帯（P2）で分断された様相を示す．日高山地に伴うブーゲー重力異常

の高まりは最大 +120mGal で北海道を南北に縦走している．浦河沖の負異常帯は北側では，稚内から焼尻付近の負異常帯へ追跡でき，また，南側では，日本海溝の陸側の負異常帯へ連続する（N2）．

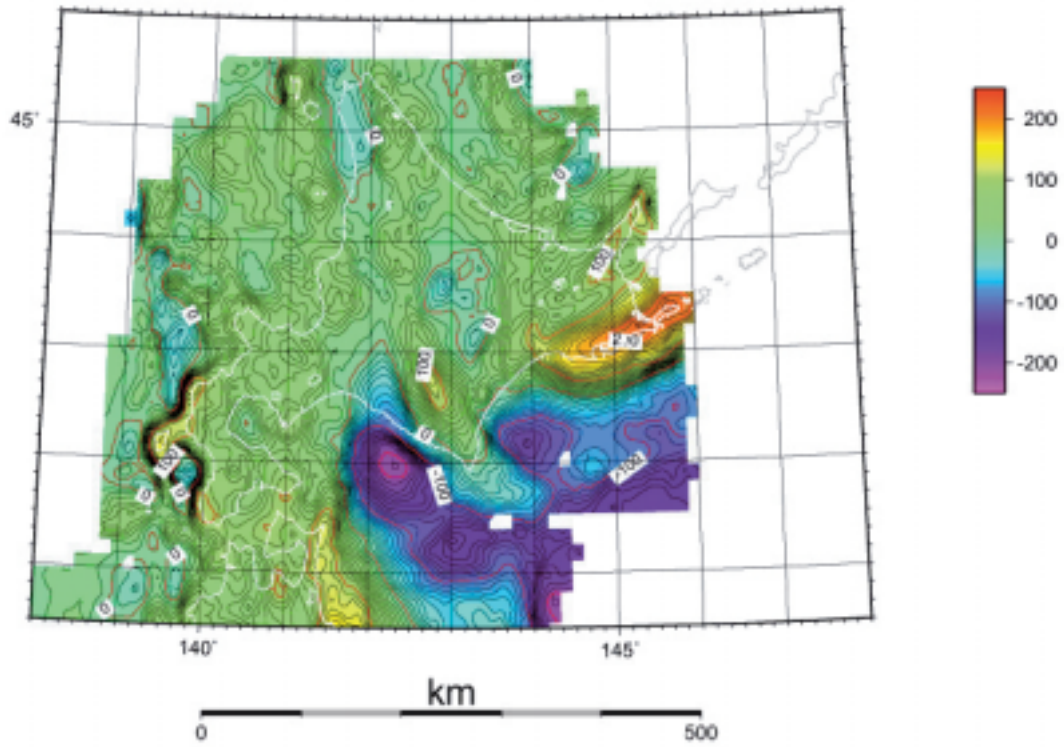
（2）東北日本（Fig.5）

ブーゲー異常図では，海溝の外側には +360 ~ 370mGal に及ぶ高ブーゲー異常帯が認められる．海溝から内弧側に向かって，相対的な負異常帯，相対的な正異常帯がそれぞれほぼ海溝軸に並走している．この正・負の異常帯は萩原（1984）により P，N ゾーンと呼ばれた異常帯である．前者の負異常帯は北側では日高沖の負異常域につらなる（N2）．また，後者の正異常帯（P3）は北緯 38 度 30 分付近で，2 列（P3，P4）に分かれるが，この部分は構造的には南部北上帯の南東延長部にあたる．一方，日本海沿岸部では，能代，秋田沖から新潟付近にかけて相対的なブーゲー重力異常の凹部が連続しており，この付近に厚い堆積層の存在が推定される（N4）．秋田沖の日本海盆では +240 ~ 250mGal のブーゲー異常が認められる．

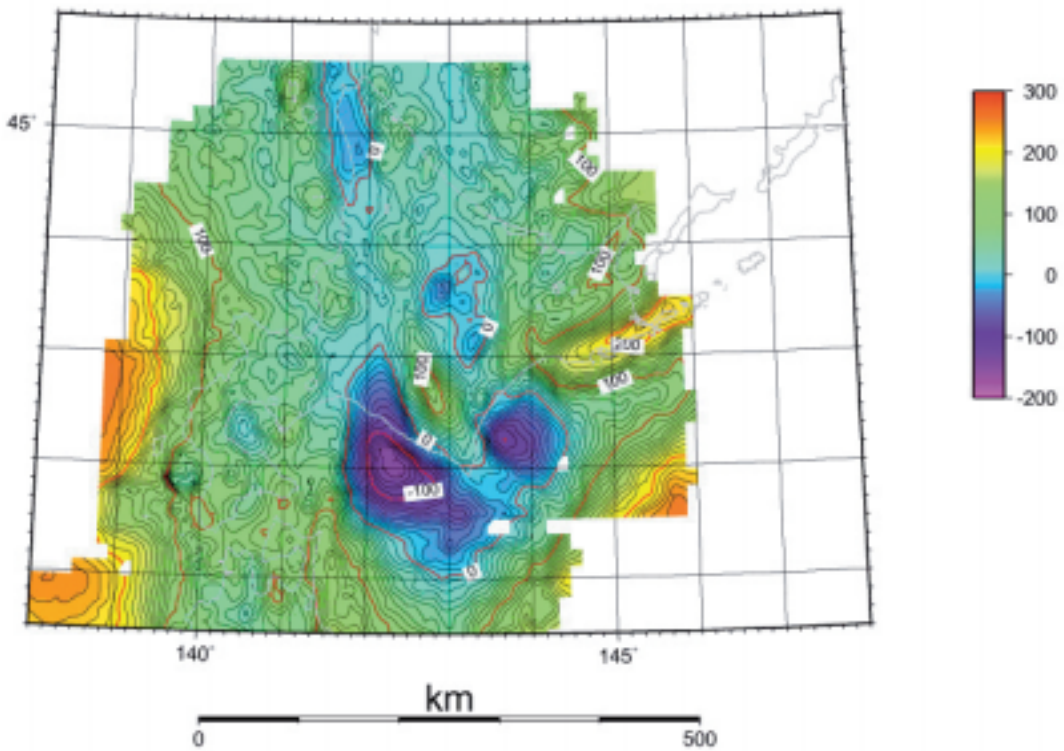
（3）関東・中部・近畿周辺（Fig.6）

海溝の 3 重会合点付近のフリーエア異常は +310mGal におよぶ．ここはブーゲー異常の凹部となっているが，値的には +120 ~ +200mGal の正の異常域となっている（TJ，N8）．この凹部は千葉県東方沖で首都圏を東西に横断する負異常域に連続する．北緯 35 度 50 分付近の日本海溝軸は第一鹿島海山が陸側に衝突しているが，この付近のブーゲー異常の等値線にも海洋地殻の断裂を示唆する屈曲が認められる．

フリーエア異常で見ると，駿河湾から南海トラフ沿いのフリーエア異常は -50 ~ 70mGal の負異常，相模湾では -40mGal の負異常が認められる．また，伊豆東方線（石橋，1980）に沿って，相対的に凹のフリーエア異常，銭州海嶺南縁部に -40mGal 程度の負異常が存在する．また，熊野灘沖では -90mGal に達する負異常域となっており，ここでは重力的な不均衡が顕著であることが



(a)



(b)

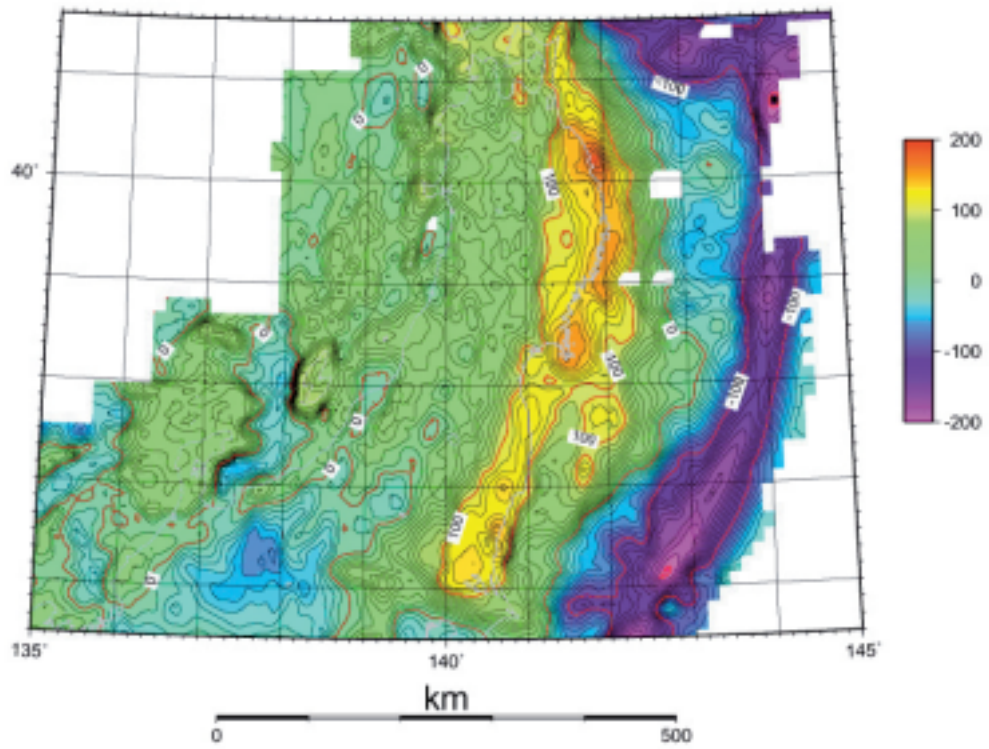
Fig.4 北海道

(a) Free-air anomaly map of Hokkaido and its adjacent seas.

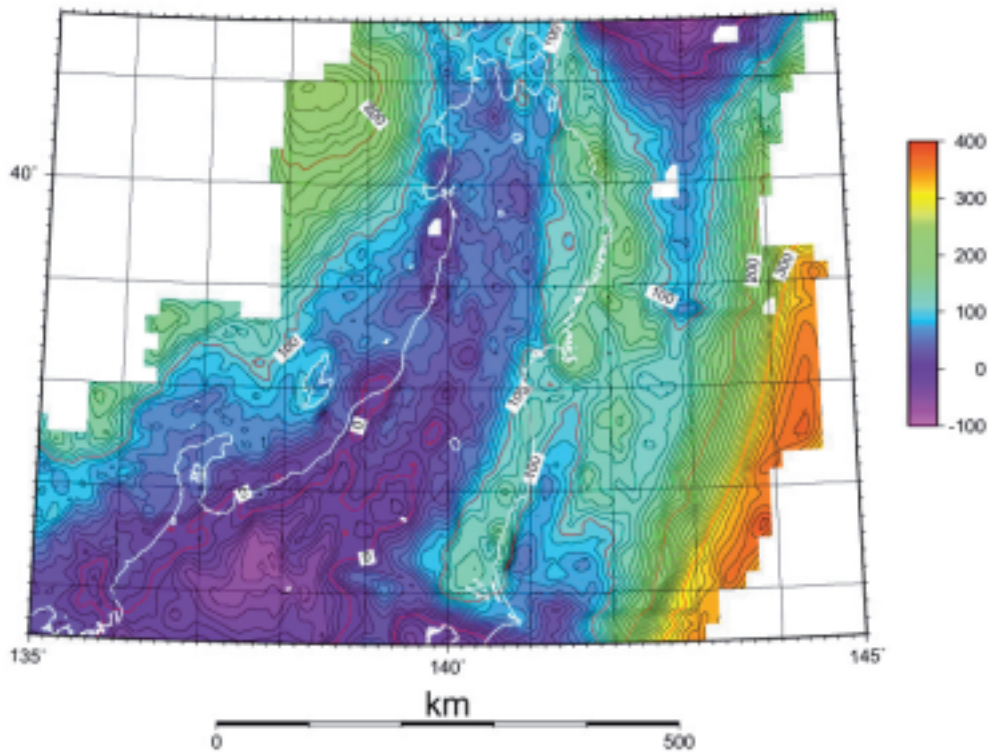
Contour interval is 10mGal

(b) Bouguer gravity anomaly map of Hokkaido and its adjacent seas.

Contour interval is 10mGal, and an assumed density is $2,670\text{kg/m}^3$.



(a)

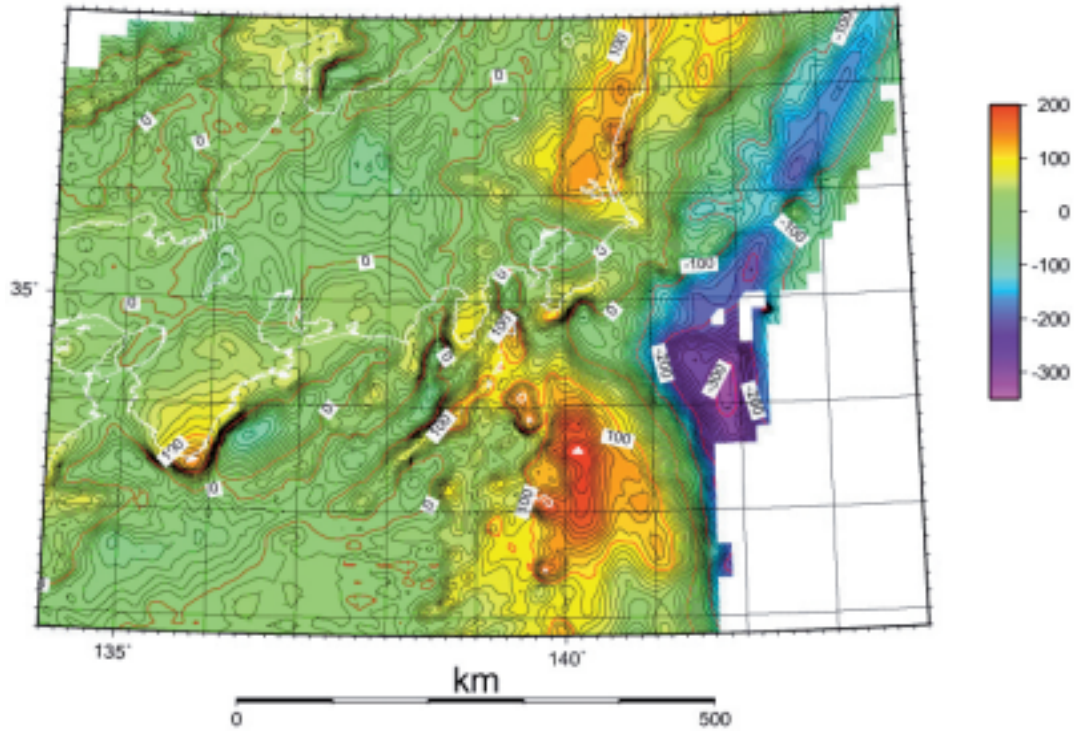


(b)

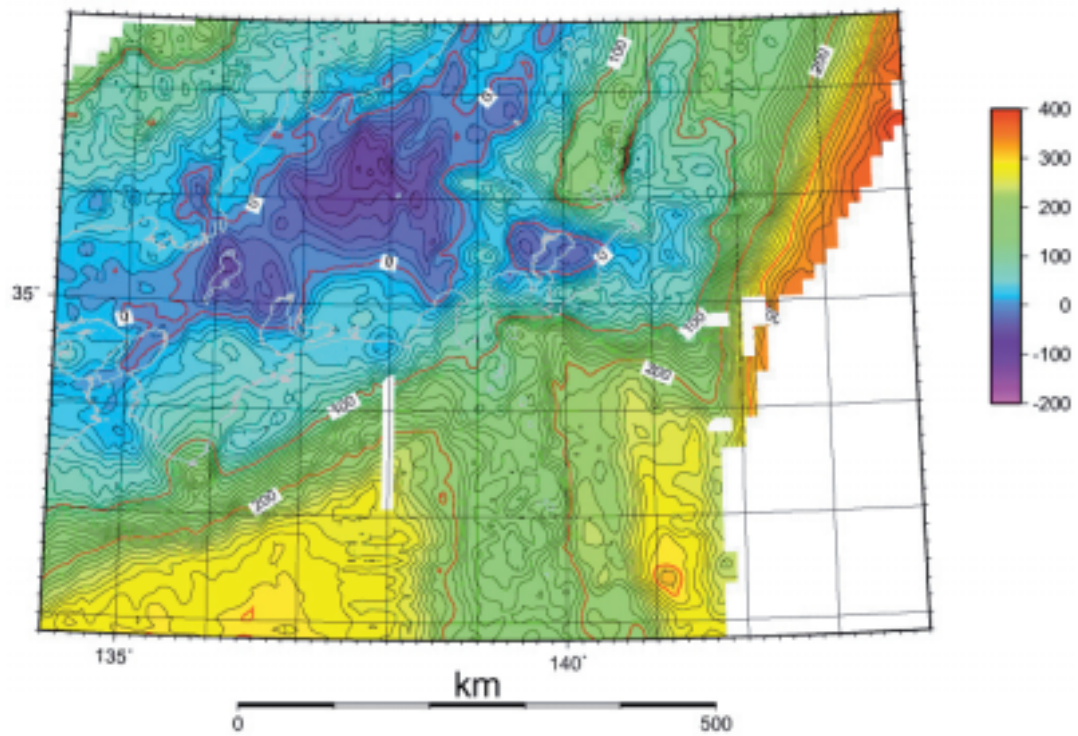
Fig.5 東北日本

(a) Free-air anomaly map of Tohoku Japan and its adjacent seas.
Contour interval is 10mGal.

(b) Bouguer gravity anomaly map of Tohoku Japan and its adjacent seas.
Contour interval is 10mGal, and an assumed density is 2,670kg/m³.



(a)



(b)

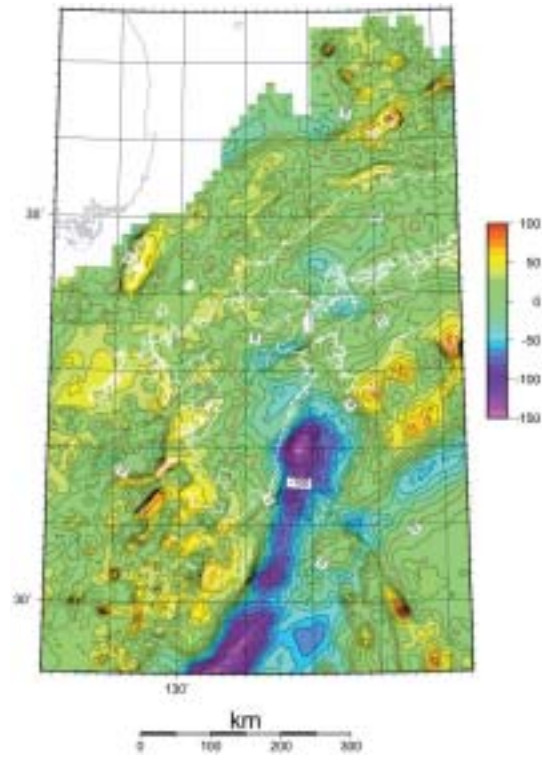
Fig.6 関東・中部・近畿周辺

(a) Free-air anomaly map of Kanto district and its adjacent seas.

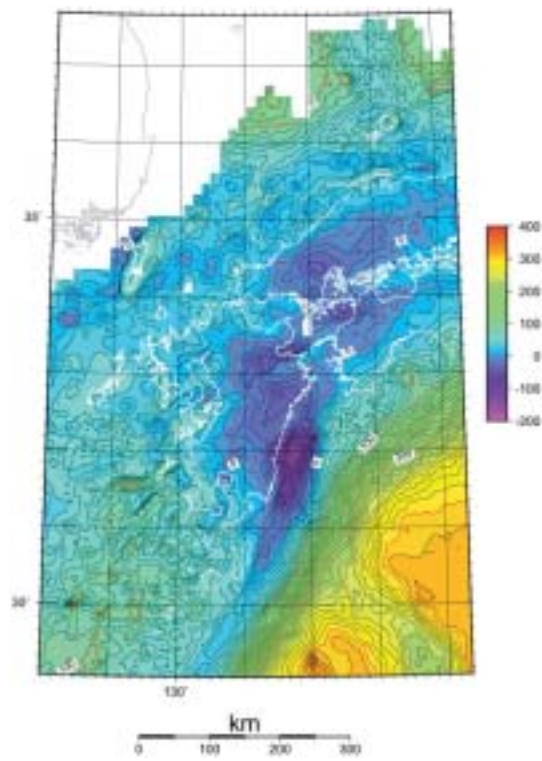
Contour interval is 10mGal.

(b) Bouguer gravity anomaly map of Kanto district and its adjacent seas.

Contour interval is 10mGal, and an assumed density is $2,670\text{kg/m}^3$.



(a)



(b)

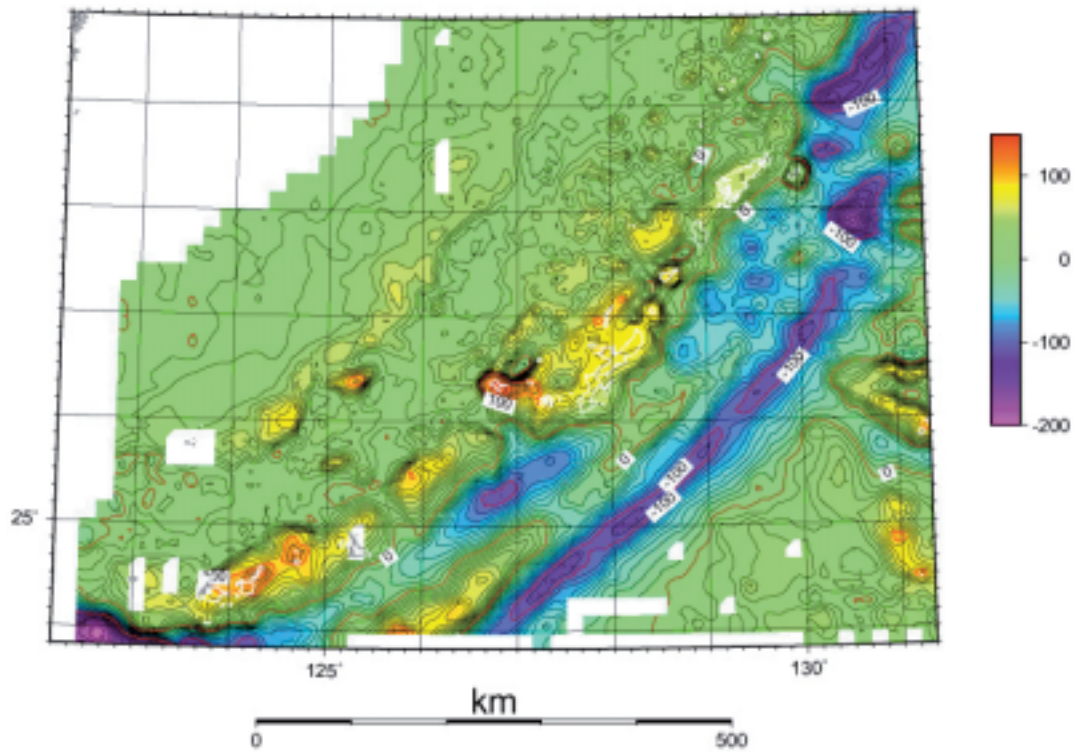
Fig.7 九州・中国・四国周辺

(a) Free-air anomaly map of Kyusyu and its adjacent seas.

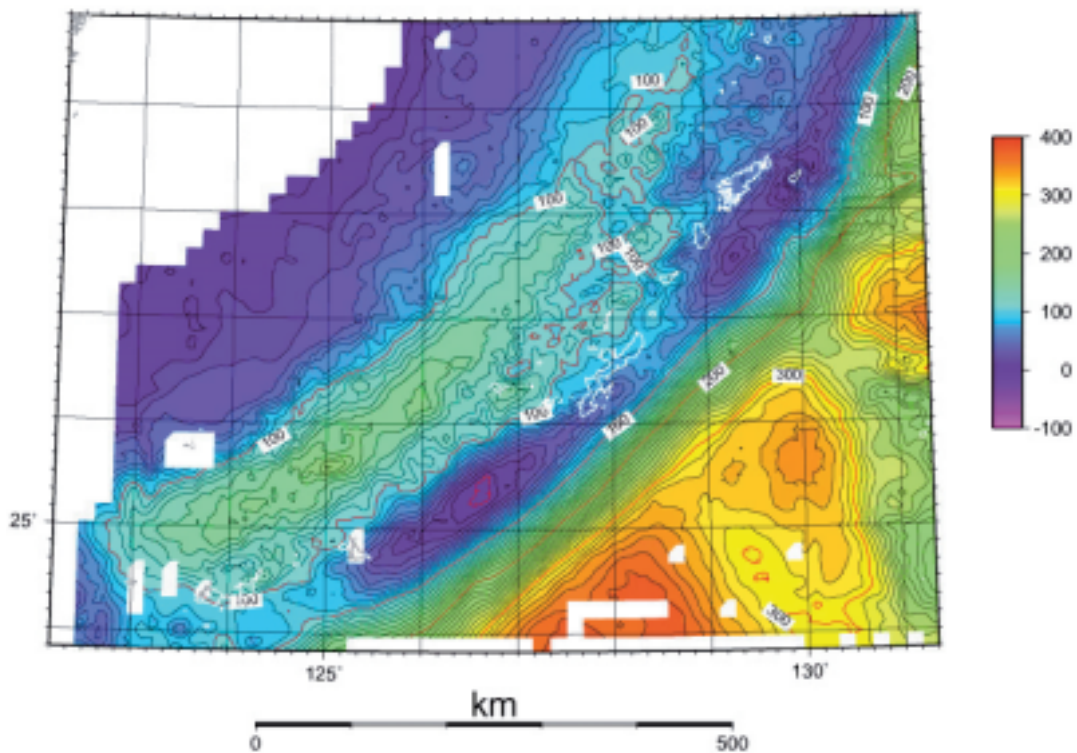
Contour interval is 10mGal.

(b) Bouguer gravity anomaly map of Kyusyu and its adjacent seas.

Contour interval is 10mGal, and an assumed density is $2,670\text{kg/m}^3$.



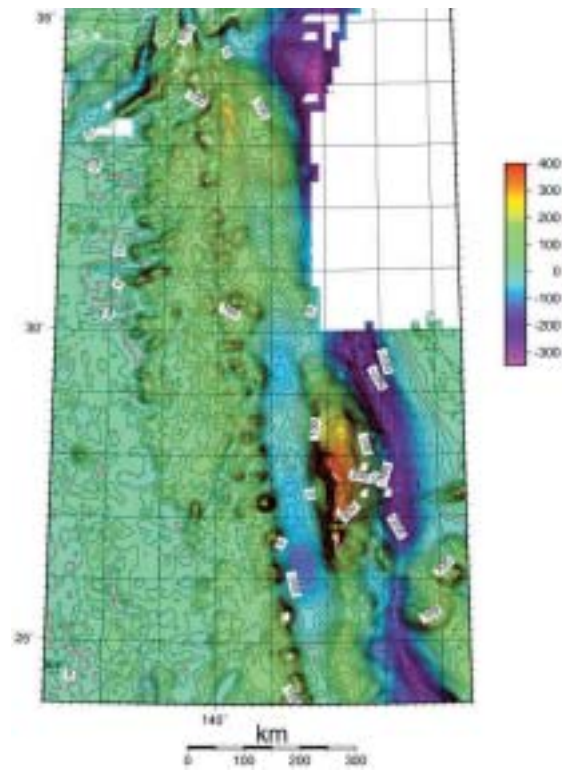
(a)



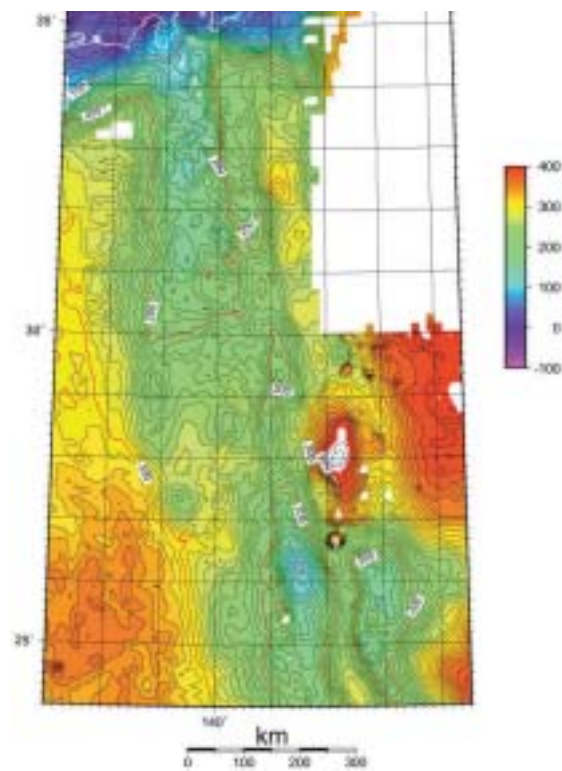
(b)

Fig.8 南西諸島

- (a) Free-air anomaly map of Nansei-Shoto (Ryukyu-Islands) and its adjacent seas. Contour interval is 10mGal.
- (b) Bouguer gravity anomaly map of Nansei-Shoto (Ryukyu-Islands) and its adjacent seas. Contour interval is 10mGal, and an assumed density is $2,670\text{kg/m}^3$.



(a)

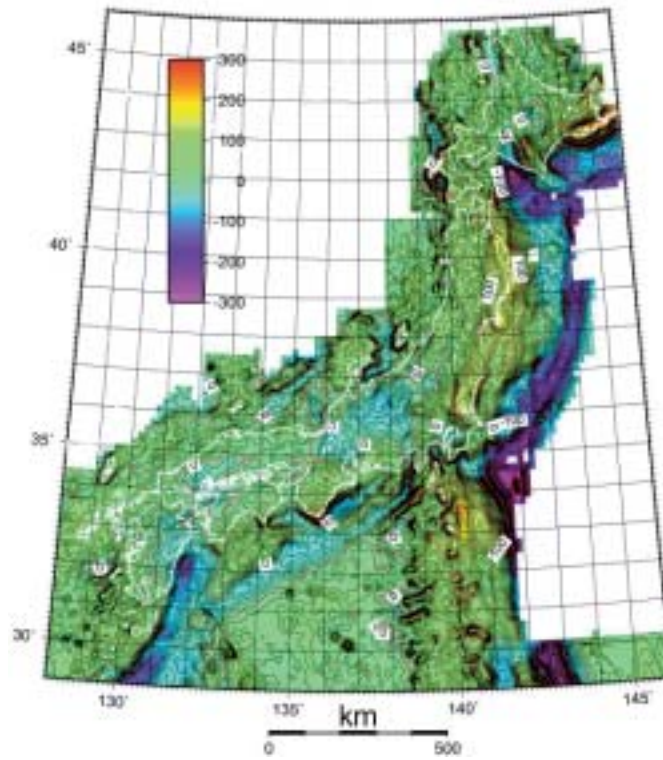


(b)

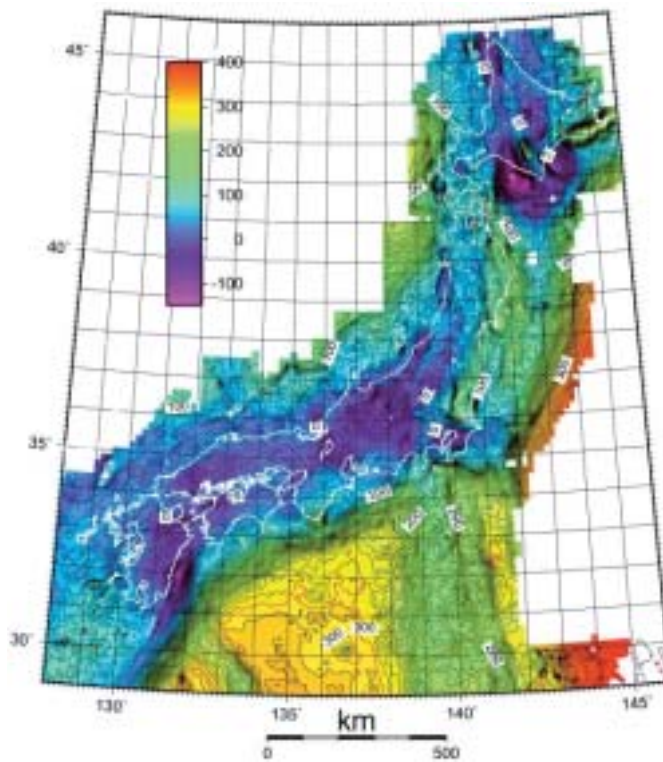
Fig.9 南方諸島

(a) Free-air anomaly map of Nanpo-Shoto (Izu-Ogasawara Islands) and its adjacent seas. Contour interval is 10mGal.

(b) Bouguer gravity anomaly map of Nanpo-Shoto (Izu-Ogasawara-Islands) and its adjacent seas. Contour interval is 10mGal, and an assumed density is $2,670\text{kg/m}^3$.



(a)



(b)

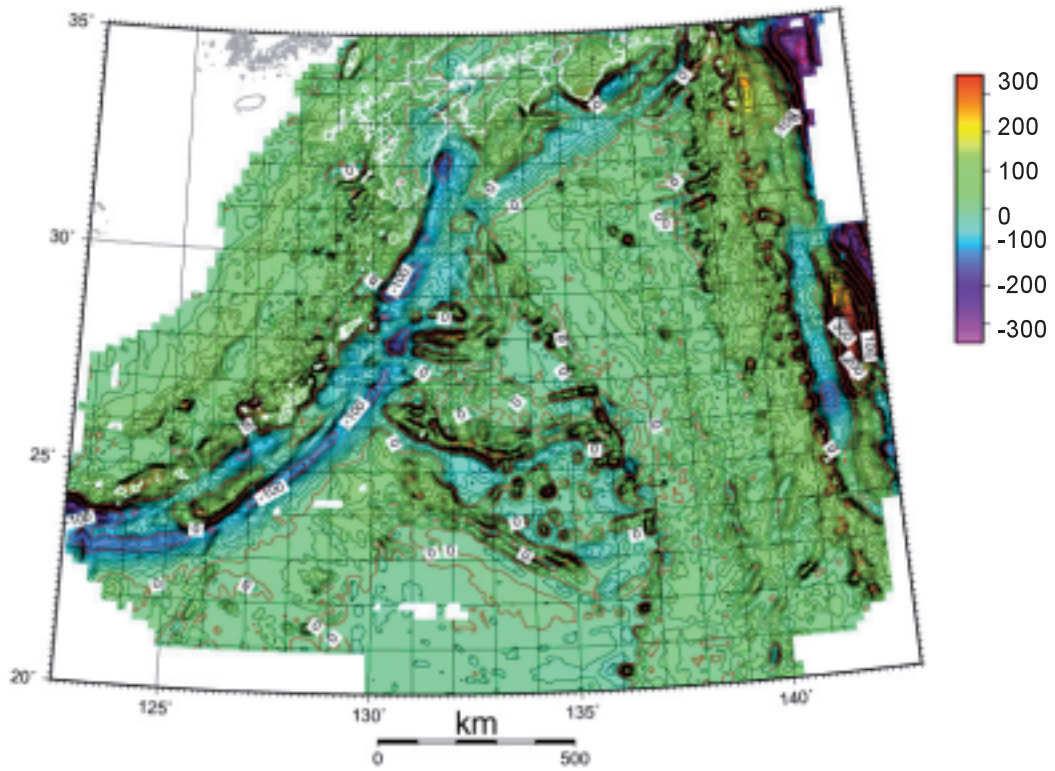
Fig.10 日本列島

(a) Free-air anomaly map of Japanese Islands and its adjacent seas.

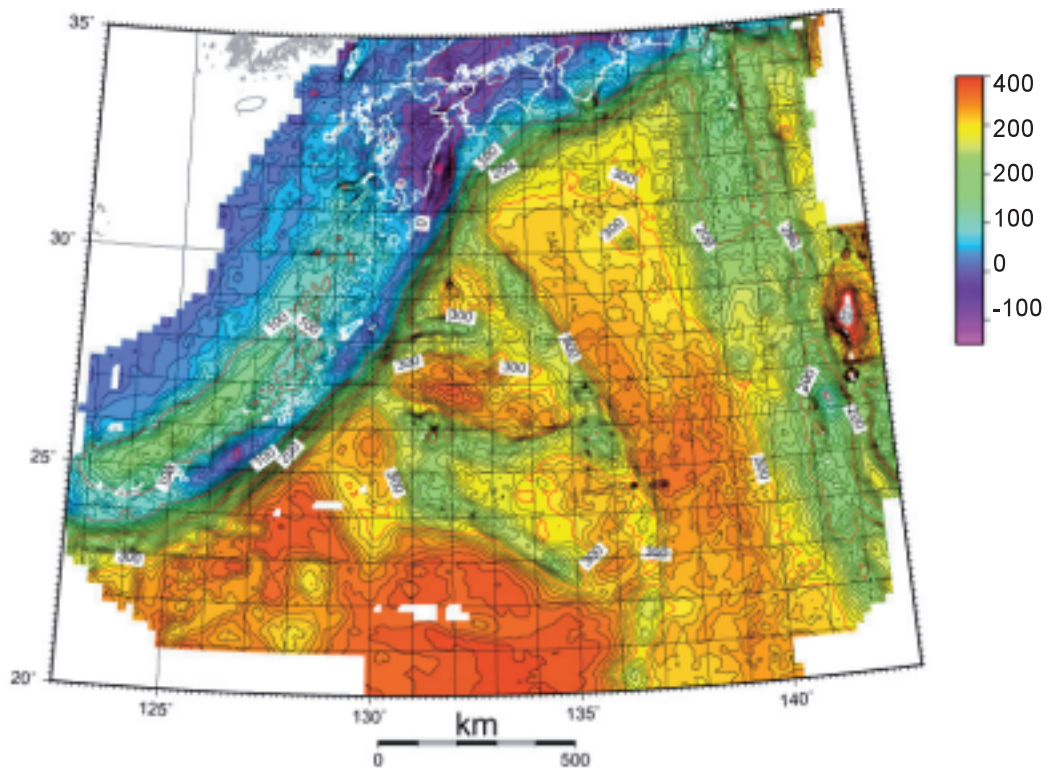
Contour interval is 10mGal.

(b) Bouguer gravity anomaly map of Japanese Island and its adjacent seas.

Contour interval is 10mGal, and an assumed density is $2,670\text{kg/m}^3$.



(a)



(b)

Fig.11 南方海域

(a) Free-air anomaly map of the southern seas of Japan, Contour interval is 10mGal.

(b) Bouguer gravity anomaly map of the southern seas of Japan, Contour interval is 10mGal, and an assumed density is $2,670\text{kg/m}^3$.

わかる(瀬川, 2000)。

銭州海嶺はフリーエア異常では+100mGalに達する異常が顕著に認められる。ブーゲー異常との関連では、四国海盆北縁部に認められる北西方向に延びる Outer gravity high (ZR) の凸部に相当していることはその成因と関連して注目すべきであろう。駿河湾では、駿河トラフ軸付近がブーゲー異常の急変部となっており、伊豆側下部地殻が隆起していることが推察される (Fig.15; T5 断面)。フリーエア異常では御前崎沖から南西方向に延びる外縁隆起帯とその内側の前弧海盆に伴う正および負の異常域が認められる。この付近の

ブーゲー異常では外縁隆起帯の特徴はうすれるものの、前弧海盆に対応する凹状の異常域が遠州灘沖及び熊野灘沖に認められる (L1, L2)。潮岬付近ではブーゲー異常が相対的に+100mGal程度 of 正異常域が存在する (A)。このようなトラフ軸の内側に局地的に存在する正異常域は規模は異なるが、室戸岬付近 (B: +20 ~ 30mGal), 土佐湾西部 (C: +40mGal), 足摺岬付近 (+20mGal) にも認められる。潮岬付近の重力異常の原因としては酸性岩体によるものとする考えもあるが(本多・河野, 2004), ブーゲー異常が相対的に正であることから、より密度の高いプレートのひずみによっ

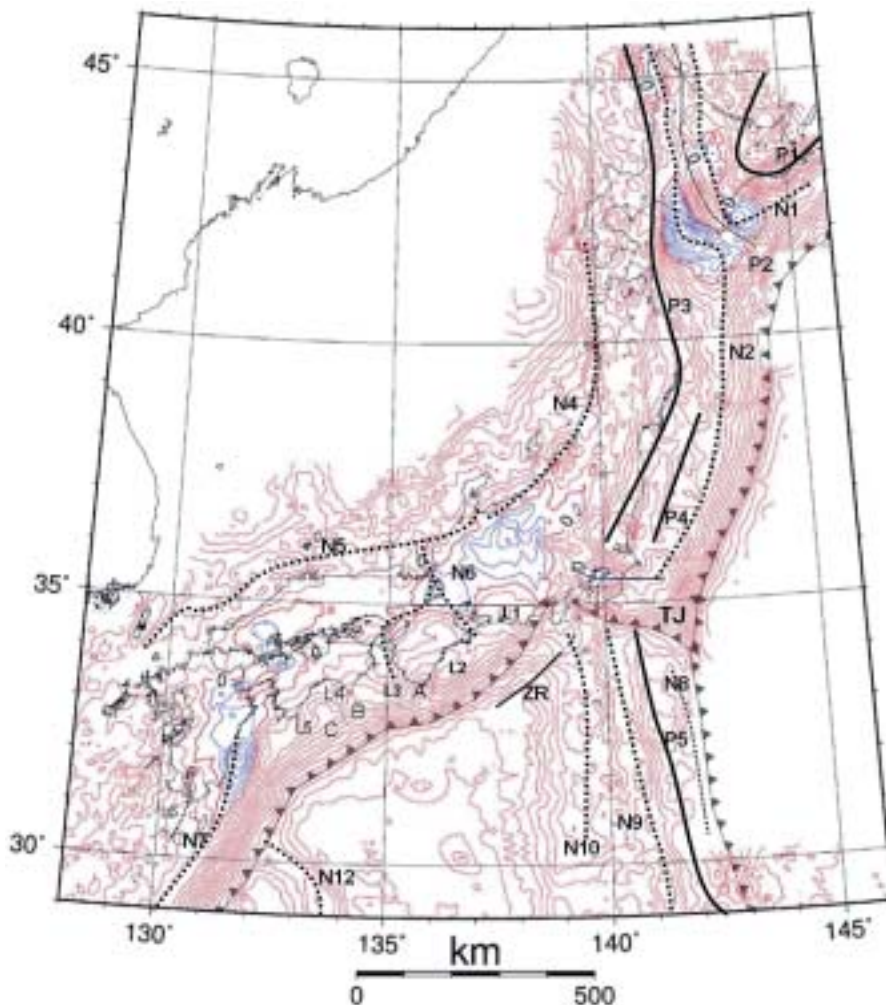


Fig.12 日本列島とその周辺海域ブーゲー重力異常図の解釈図

Zonations of the Bouguer gravity anomalies of Japanese Islands and its adjacent seas.
 P1 to P5 mean positive gravity anomaly zones, and N1 to N10 mean negative anomaly zones.
 L1 to L6 also mean relative low anomaly zones. A, B, and C mean local positive anomalies.
 ZR means arrangement of the Zenisu Ridge.

て生じた構造とも考えられる。日本海側では若狭湾の北部から琵琶湖さらに、伊勢湾へと連なるブーゲー異常の凹部 (N6) が認められるが、この付近は沈み込んだフィリピン海プレート上面温度の谷部に対応していることが注目される。

(4) 九州・中国・四国付近 (Fig.7)

日向灘にはフリーエア異常で -140mGal に達する負異常が認められるが、ここはブーゲー異常でも -100mGal の負異常域となっている。この負異常域は南西諸島海溝沿いに SSW へ連続する

(N7)。

九州・パラオ海嶺の北縁部はブーゲー重力の凹部となり相対的に 80mGal 程度の落ち込みが認められる (N12)。日本海側では、北陸沿岸付近から若狭沖、隠岐海峡付近を通り、対馬東側に追跡できるブーゲー異常の凹部が断続的に認められる (N5)。一方、隠岐島は +70mGal の正異常を示す。鹿児島湾から南方にかけてはブーゲー異常は相対的に 30mGal 程度の凹異常域となっており (L6)、鬼界カルデラでは 30 ~ 40mGal の凹異常がみとめられる。このような特徴は下部地殻の凹

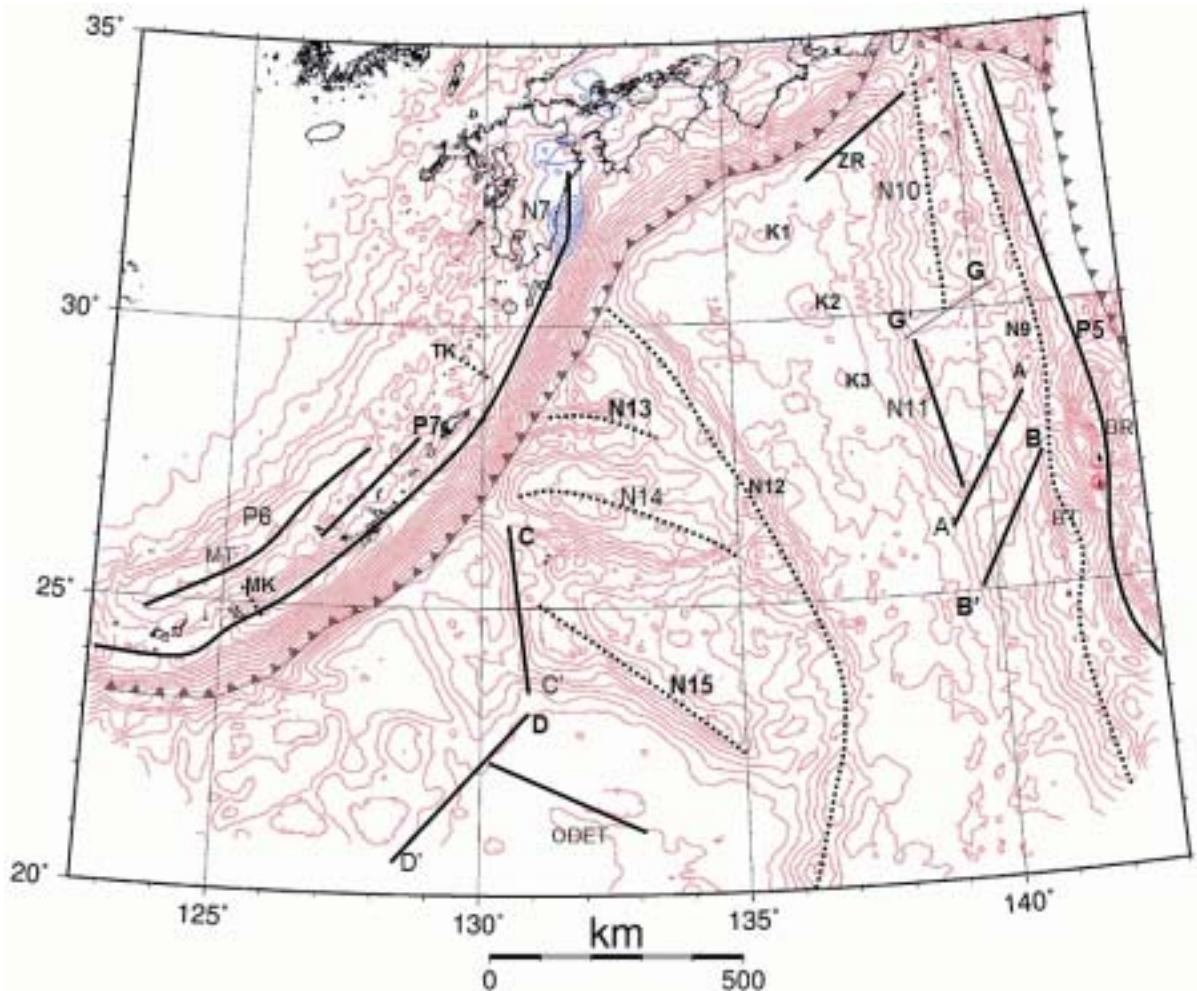


Fig.13 日本南方海域のブーゲー重力異常図の解釈図

Zonations of the Bouguer gravity anomalies of the southern seas of Japan.

P5 to P7 mean relative positive anomaly zones, and N10 to N15 mean relative low anomaly zones. K1, K2, K3 are locations of the Kinan seamounts. TK means Tokara channel, Mk; Miyako gap, MT; Miyako seamount, respectively. The lines G-G', A-A', B-B', C-C', and D-D' are tectonic lines revealed by gravity anomaly characteristics. ODET means Oki-Daito escarpment.

部にカルデラが形成されたことを示唆する。その他の特徴としては、甌島列島、宇治群島、草垣島などの第三系の島列がブーゲー異常でも明瞭な凸部の異常域となっており、これらの島の基盤が密度の高い岩体で形成されていることが推察される。

(5) 南西諸島周辺 (Fig.8)

南西諸島海溝沿いには -110mGal 程度のフリーエア異常が認められる。海溝より外側のフィリピン海側では +340 ~ +370mGal のブーゲー異常を示す。海溝軸内側のブーゲーの凹部は日向灘沖から連続するもので、奄美大島東方から沖縄・宮古深海平坦面付近につらなり、そのピーク値は 0 ~ +10mGal である (N7)。この凹異常帯の陸側では、不明瞭ながら沖永良部島西方から久米島にかけて相対的な正のブーゲー異常帯 (P7) が認められる。南西諸島弧では弧を横断するトカラ凹地、慶良間海裂などの構造線が存在するが、ブーゲー異常からはトカラ凹地に伴う凹異常域 (TK) や宮古鞍部に伴う等値線の湾曲 (MK) が認められるものの、顕著なものではない。沖縄トラフはフリーエア異常ではアイソスタシーが成り立っていることが推定されるが、ブーゲー異常では +150mGal 程度の異常を示す (P6)。沖縄トラフでの凸状のブーゲー異常は、下部地殻の隆起を示すが、一般的な海洋性地殻に伴うブーゲー重力異常の半分程度の値しかなく、むしろ大陸性地殻の存在を示唆する。宮古海山は沖縄トラフ内で最も高い +190mGal の異常 (MT) をしめすが、この異常は宮古海山が密度の高い岩体から構成されていることを示唆する。

(6) 伊豆 小笠原諸島周辺 (Fig.9)

伊豆 小笠原海溝付近のフリーエア異常の極小値は -220 ~ -200mGal を示すが、小笠原海台が衝突する付近では -40mGal 程度となる。一方、ブーゲー異常では小笠原諸島のやや北寄りに最大 +420mGal の異常が認められる (BR)。この正異常域は伊豆 小笠原弧北部の前弧域に連なり、

青ヶ島東方では +310mGal の異常を示す (P5)。この正異常域の背弧側はブーゲー異常の相対的凹部となっており、小笠原トラフ付近から北部の前弧域にまで連続性が認められる (N9)。そして、その境界部は重力異常の急変帯として追跡される。伊豆 小笠原弧北部 (特に北緯 31 度以北) では、さらにその内側に階段状のブーゲー異常の落ち込みが認められる。伊豆 小笠原弧北部ではブーゲー異常は火山フロントの背弧側で凹部となり、その値は概ね +140 ~ 150mGal である (N10)。この凹部は G ライン (Ueda, 1994; N30° 30', E140° 30' と N29° 40', E139° 00' を結ぶ線で以後、鳥島西方構造線と仮称する) を境にそれ以南では、西側へずれ西七島海嶺付近が最凹部となる。伊豆 小笠原弧の南北を分断する構造線としては孀婦岩構造線 (A-A') (湯浅・村上, 1985; N28°, E140° 付近を NNE-SSW に通過する境界線で大町海山と天保海山の東縁を境する) が知られているが、重力的には、西之島西方と金曜海山の東縁を結ぶライン (B-B') (N28°, E141°, N26°, E140° を結ぶラインで、ここでは西之島構造線と仮称する) が明瞭で、この境界線以南では、伊豆 小笠原弧としての負異常帯は内弧側でなく、前弧域で最凹部となる。ちなみに小笠原トラフのブーゲー異常は +100mGal の異常を示す (BT)。小笠原海台が衝突する付近では、ブーゲー異常は相対的に凹異常域となっており、大陸地殻の厚化を示唆する。

(7) 日本南方海域 (Fig.11)

日本南方海域については、3km x 3km メッシュ地形によるブーゲー重力異常図が春日ほか (1992; 1994) によりまとめられている。今回のブーゲー異常図では、作図範囲を伊豆 小笠原弧北部、南海トラフから日向灘海域にまで包含するとともに、北緯 24 度以南のフィリピン海盆もその範囲に加えている。

イ 四国海盆・パレスベラ海盆

フリーエア異常は海山や崖の部分を除けば、0 ~ 30mGal で、傾向としては東側に向かって漸増

する傾向を示す。ブーゲー異常の範囲は概ね 300mGal 以上の大きさを示し、北緯 25 度付近では最大 360mGal に達する。25 度以北では、フリーエア異常とは逆に九州パラオ海嶺側から東に向かって漸減する傾向が認められる。また、紀南海山列の海山の付近は相対的に凹部となっており、海山の根の存在を暗示させる。北緯 23 度以南のパレスベラ海盆では、四国海盆とは逆に、西七島海嶺側でブーゲー異常が大きく、また、重力異常はリッジの配列に沿った NE - SW 方向を示す。

ロ 九州パラオ海嶺

フリーエア異常は海嶺の起伏を反映した局地的な異常を示す。特に、海嶺の東側で負異常が点在している。一方、ブーゲー異常では地形的起伏に対応する異常は殆ど見られず、ブーゲー異常は全体的に相対的な凹部となっており (N12)、大陸性地殻の厚化を示す。北緯 25 度 30 分付近でブーゲー異常は +200mGal となり、四国海盆と比べて 160mGal 程度の落ち込みを示す。一方、北緯 22 度 30 分から北緯 24 度 50 分では、九州パラオ海嶺に沿ってブーゲー異常が最も大きい値 (+290mGal) を示す。この付近は海嶺の方向が変化する部分に相当しており、その影響が現れていると推察される。

ハ 奄美・大東海域

西側を南西諸島海溝、東側を九州パラオ海嶺、南側を沖大東海嶺の南縁部で囲まれた海域は奄美・大東海域とも呼ばれており、フィリピン海盆のテクトニクスでも未解決の課題が多いところである。

本海域の北側から、喜界海盆、奄美海台、北大東海盆、大東海嶺、南大東海盆、沖大東海嶺というように、海盆と海台・海嶺が相互に配列している。

各海盆のフリーエア異常は海山などの存在付近を除けば、概ね 0mGal に近く、アイソスタシーが成立していることを示唆する。大東海嶺の南縁部に沿っては、50 ~ 60mGal の負異常域が認められ

る。一方、ブーゲー異常は、北部の喜界海盆では +320mGal 程度、北大東海盆では 300 ~ 370mGal、南大東海盆では 270 ~ 330mGal のブーゲー異常を示しており、北大東海盆が最も海洋性地殻の特徴を示現しており、他の 2 海盆では、四国海盆並の地殻構造を有すると推定される。奄美海台・大東海嶺・沖大東海嶺では、ブーゲー異常は相対的に凹部となっており、それぞれその極小値は 210mGal、190mGal、200mGal を示す (N13, N14, N15)。大東海嶺と沖大東海嶺は東経 132 度以西で大陸性地殻が最も発達しており、それ以东では 250mGal 程度のブーゲー異常となる。一方、その西縁部にあたる東経 130 度 30' ~ 40' 付近はブーゲー重力の急変部となっており、構造線を形成していると推察される (C-C')。

ニ フィリピン海盆

沖大東海嶺以南のフィリピン海盆は、370 ~ 380 ~ mGal のブーゲー異常の等値線に見るように、本図中では海盆としてはブーゲー重力異常が最も大きい海域である。図中 D - D' で示したラインを境に、西側では大陸性地殻の発達を示唆するブーゲー異常の凹部が点在し、一方東側ではブーゲー異常は沖大東海底崖付近での落ち込みを除けば比較的の平坦な様相を示す。フリーエア異常でも、西側では 0 ~ 30mGal、で等値線の複雑な湾曲が認められるが、東側ではほぼ -10 ~ 0mGal で非常に平坦な分布を示す。このことから、D-D' 付近がフィリピン海盆を東西に分ける構造線に相当する可能性がある。

5 結論

今回、新しく開発したメッシュ自動分割法により、日本列島とその周辺大陸棚海域、及び、四国海盆、フィリピン海盆を含む日本南方海域のブーゲー重力異常図を作成した。また、この成果をもとに重力異常の定性的な解釈を行った。これらの図には、本紙面では述べつくされていないものも

あるが、以下のことが明らかとなった。

(1) 東北日本の前弧域では相対的に正のブーゲー重力異常帯が海溝に並走するが、南部北上体の海域への延長部の北緯 38° 00', 東経 141° 40' 付近で 2 列に分かれる。

(2) 駿河湾ではブーゲー重力異常の等値線が駿河トラフ軸部で北側に屈曲しており、伊豆側の下部地殻の隆起を示唆する。

(3) 南海トラフの内側ではブーゲー重力異常の局地的な高異常域が潮岬付近、室戸岬、足摺岬とその周辺、土佐湾の南西部に存在する。これらの異常は南海トラフ沿いの震源のブロック化と関連する可能性がある。

(4) 沖縄トラフ付近は相対的に凸のブーゲー異常を示しており下部地殻の隆起が推定される。しかし、ブーゲー異常値のピーク値は ~ 160mGal であり、通常の海洋性地殻に伴う異常値に比べて半分程度の大きさでしかなく、大陸性地殻の存在が推定される。

(5) 伊豆 小笠原弧では小笠原海嶺から連続する高重力異常帯が前弧域に N-S 方向に配列する。

伊豆 小笠原弧北部では、ブーゲー重力異常が火山フロント側に向かって階段状に減少しており、下部地殻が地溝状の構造を持つことを示唆する。また、弧を南北に分断する 2 列の構造線（鳥島西方構造線、西之島構造線）が推定される。

(6) 四国海盆のブーゲー異常は九州 パラオ海嶺側から伊豆 小笠原弧側へ緩やかな減少傾向を示すが、フリーエア異常にはこれとは逆の傾向を示す。奄美海台、大東海嶺、沖大東海嶺、及び九州 パラオ海嶺では大陸性地殻の存在を示唆するブーゲー異常の落ち込みが認められる。また、海盆に関しては、喜界海盆で +320mGal, 北大東海盆で 300 ~ 370mGal, 南大東海盆で 270 ~ 330mGal, 及びフィリピン海盆で 370 ~ 380mGal を示し、これらの海盆の地殻構造に違いが推察される。

(7) 沖大東海嶺以南のフィリピン海盆では北緯 24° 東経 131° と北緯 21° 東経 129° を結ぶラインを境に重力異常の様相が急変しており、この部分がフィリピン海盆を東西に分断する構造線であると推察される。



Fig.14 日本列島とその周辺海域の地形と断面線の位置図
Topography and location map of selected lines of profiles along T1 to T9.

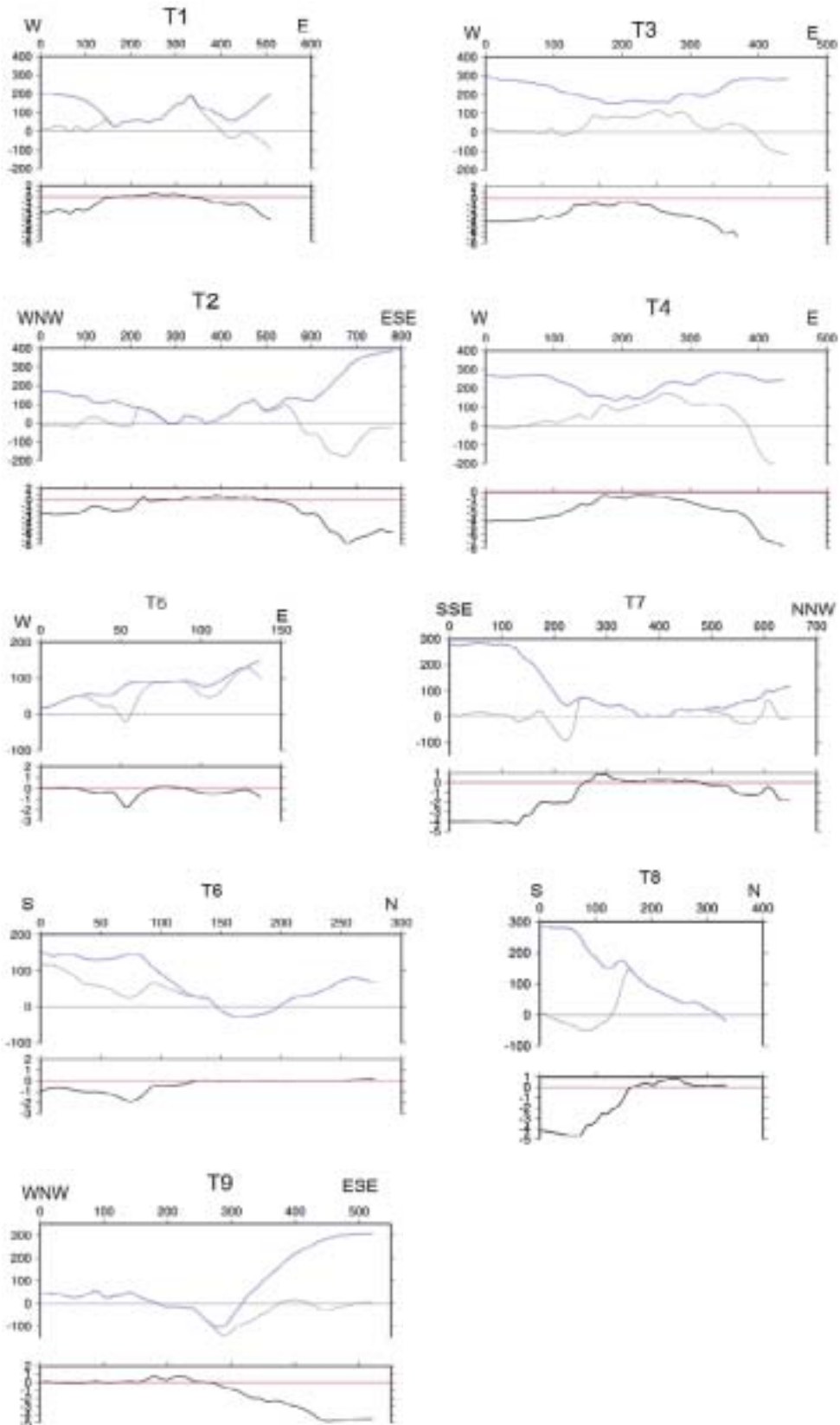


Fig.15 日本列島とその周辺海域の地形と重力異常の断面図 (T1 to T9)
 Transects of topography and gravity anomalies along T1 to T9.
 Upper column : Free-air anomaly is shown by a black line and Bouguer anomaly by a blue line in mGal unit.
 Lower column: Topographic cross-section is shown by black line in km unit.

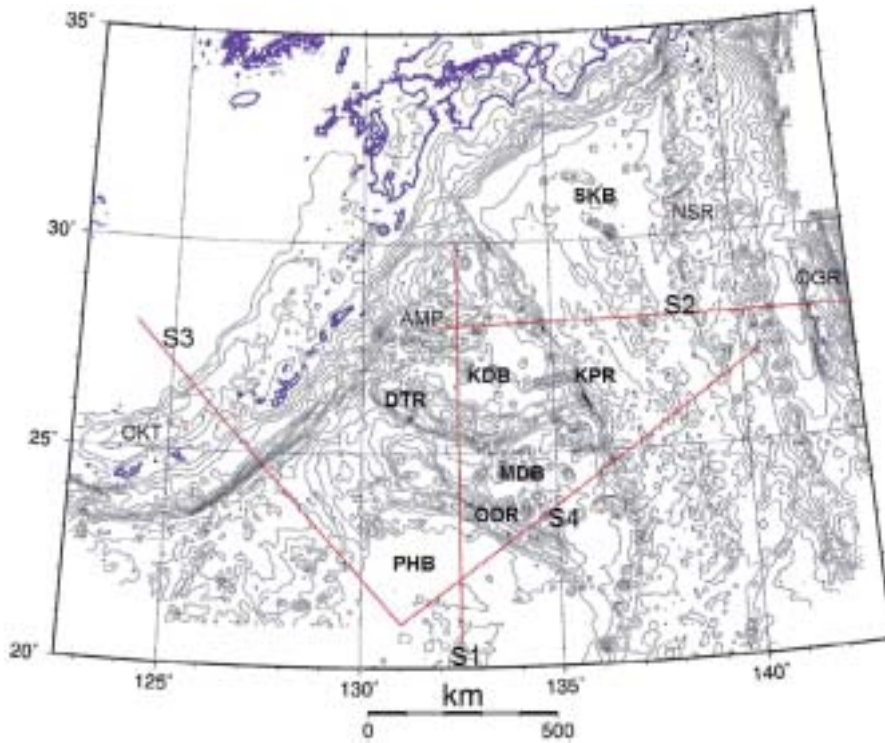


Fig.16 日本南方海域の地形と断面線の位置図
Topography and location map of selected lines of profiles along S1 to S4.

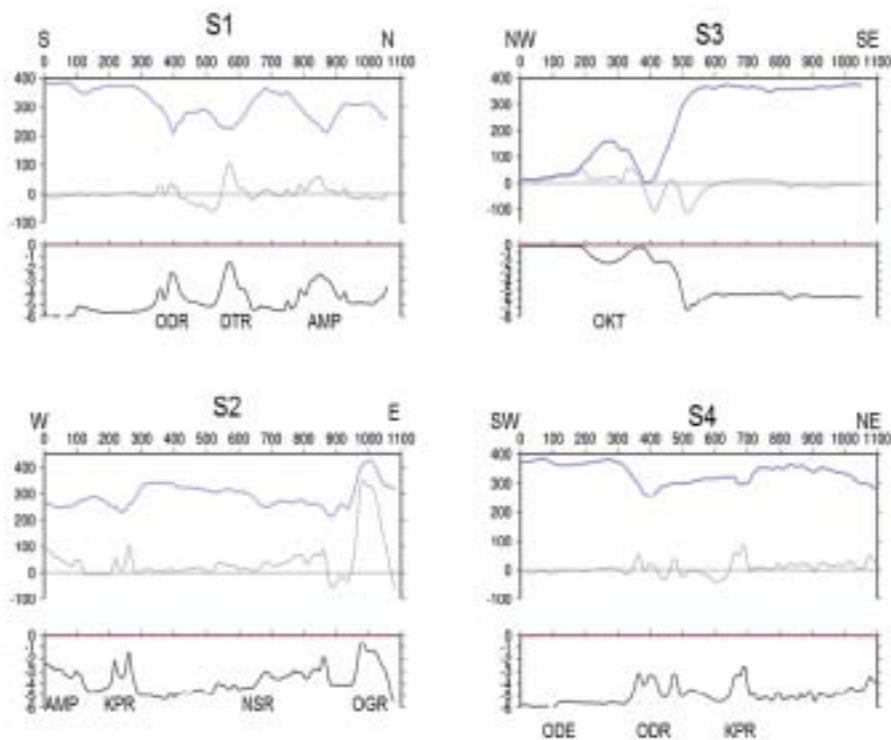


Fig.17 日本南方海域の地形と重力異常の断面図 (S1 to S4)
Transects of topography and gravity anomalies along S1 to S4.
Upper column : Free-air anomaly is shown by a black line and Bouguer anomaly by a blue line in mGal unit.
Lower column : Topographic cross-section is shown by black line in km unit.

謝 辞

本論文をまとめるに際し、海洋情報部日本海洋データセンターから MGD77 データの提供を受けた。記して感謝の意を表す。また、本論文は過去の水路部時代を含めた長年の測量成果に基づく結果であり、その測量ならびにデータ処理に携わった多くの方々に敬意を表します。本論文の図面の作成には GMTV.3.4 を用いた。

参考文献

- Ganeko, Y. and Koyama, K. (1981), Gravity data file of the Hydrographic Department and estimation of block mean gravity anomalies, *Rept. Hydrogr. Res.*, 16, 103-120.
- Ganeko, Y. and Harada, Y. (1982), Gravity anomalies around Japan, *Rept. Hydrgr. Res.*, 17, 163-180.
- Gravity Reseach Group in Southwest Japan (Representatives : Shichi, R. and Yamamoto, A.) (2001), Gravity database of southwest Japan (CD-ROM).
- 本多 亮・河野芳輝 (2004), 2004 年紀伊半島沖地震震源域及び周辺地域における海底地形補正を施した重力異常, *2004 年秋季地震学会ポスターセッション PK06*.
- 萩原幸男 (1984), 2次元フィルター法による重力ゾーニング, *測地学会誌*, 30, 1-16.
- 石橋克彦 (1980), 伊豆半島をめぐる現在のテクトニクス, *月刊地球*, 2, 110-119.
- 春日茂・加藤幸弘・木村信介・沖野卿子・大陸棚調査室員 (1992), 本州南方海域の島弧海溝系及び背弧海盆の特徴, - 水路部による地球物理学的調査結果の概要, *水路部研究報告*, 28.
- 春日茂・林田政和・大陸棚調査室員 (1994), 日本近海地磁気・重力異常図の刊行と日本南方海域の地磁気異常分布, *水路部研究報告*, 30, 329-344.
- 春日茂・小原泰彦 (1997), 日本南方海域に存在する急崖の形成過程, *水路部研究報告*, 33, 39-52.
- 河野芳輝・古瀬慶博 (1989), 100 万分の 1 日本列島重力異常図, 東京大学出版会。
- 大島章一・高梨政雄・加藤茂・内田摩利夫・岡崎勇・春日茂・川尻智敏・金子康江・小川正泰・河合晃司・瀬田英憲・加藤幸弘 (1988), 沖縄トラフ及び南西諸島周辺海域の地質・地球物理学的調査結果, *水路部研究報告*, 24, 19-44.
- Segawa, J. (1970), gravity measurements at sea by use of the TSSG, part 2, *J. Phys. Earth*, 18, 203-284.
- 瀬川爾朗 (2000), 東海・伊豆諸島海域における地球物理観測の成果 (地形・重力・地震・GPS など), *月刊地球*, 22, 768-776.
- Segawa, J. and Tomoda, Y. (1976), Gravity measurements near Japan and study of the Upper Mantle beneath the Oceanic Trench-Marginal Sea Transision Zones., in *The geophysics of the Pacific Ocean Basin and its margins, Geophys. Monogr.*, 19, AGU, 35-54.
- Shichi, R. and Yamamoto, A. (2001), List of gravity data measured by Nagoya university, *Bull. Nagoya Univ. Museum Sp. Rept.*, 9 part, 257.
- Shichi, R. and Yamamoto, A. (2001), List of gravity data measured by organizations other than Nagoya university, *Bull. Nagoya Univ. Museum Sp. Rept.*, 9 part, 318.
- Smith, W. H. F. and D. T. Sandwell (1994), Bathymetric prediction from dense satellite altimetry and sparse shipboard bathymetry, *J. Geophys. Res.*, 99, 21803-21824.
- 鈴木 亨・浅田昭・永田豊 (2001), 高密度水深データを用いて画像化した日本周辺の海底地形, *2001 年度海洋調査技術学会講演要旨集*。
- 地質調査所 (編) (2000), 日本重力 CD-ROM, 数値地質図, P-2.
- Tomoda, Y., and H. Kanamori (1962), Tokyo surface ship gravimeter -1, *J. geodetic*

- soc. Japan*, 7, 116-145.
- Tomoda, Y., Fujimoto, H. (1980), Free-air and Bouguer gravity anomaly in the West Pacific calculated from sea gravity data obtained by T. S. S. G., *J. Geod. Soc. Japan*, 26, 258-266.
- Tomoda, Y. and Fujimoto, H. (1982), Maps of gravity anomalies and bottom topography in the Western Pacific, *Bull. Ocean Res. Inst.*, Univ. Tokyo.
- 植田義夫・中川久穂・平岩恒広・朝尾紀幸・久保田隆二 (1987), 東京湾・南関東周辺の重力異常と深部構造, *水路部研究報告*, 22, 179-206.
- Ueda, Y. (1994), Study on crustal structure of Japanese Island arcs as revealed from magnetic and gravity field analysis, *Rept. Hydr. Res.*, 30, 61-174.
- 植田義夫 (2003), 地形メッシュ自動分割法による重力地形補正, *海洋調査技術*, 15, 17-27.
- 湯浅真人・村上文敏 (1985), 小笠原弧の地形・地質と孀婦岩構造線, *地学雑誌*, 94, 47-66.
- 水路部技報の参考文献
- 永野真男・桂忠彦・池田清・林田政和・春日茂・小山薫・宗田賢二・打田明雄 (1985), 大東海嶺西部の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 3, 26-33.
- 内田摩利夫・荻野卓司・池田清・林田政和・小山薫・春日茂・宗田賢二・富安義昭・宗田孝次・福島秀生・白井宣好・川井仁一 (1985), 大東海嶺東部の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 3, 34-41.
- 池田清, 桂忠彦・内田摩利夫・小山薫・春日茂・林田政和 (1986), 沖縄トラフ西部の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 4, 17-24.
- 春日茂・荻野卓司・池田清・内田摩利夫・小山薫・林田政和 (1986), 沖縄トラフ北部の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 4, 25-32.
- 小山薫・桂忠彦・池田清・内田摩利夫・春日茂・永野真男・林田政和 (1986), 南高鵬海山付近の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 4, 39-46.
- 植田義夫・平岩恒広・堀井良一 (1986), 東京湾北部の海上重力測定, *水路部技報*, 4, 130-135.
- 河合晃司・堀井孝重・岡崎勇・内田摩利夫・春日茂・小川正泰・岩淵洋・金子康江・瀬田英憲・桂忠彦 (1987), 沖縄トラフ中部の大陸棚速報, *水路部技報*, 5, 20-31.
- 小川正泰・毛戸勝政・堀井孝重・岩淵洋・金子康江・河合晃司 (1987), 火山列島付近の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 5, 32-39.
- 瀬田英憲・内田摩利夫・岡崎勇・春日茂・小川正泰・金子康江・河合晃司・堀井孝重・桂忠彦・岩淵洋 (1988), 男女海盆の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 6, 1-13.
- 小川正泰・毛戸勝政・内田摩利夫・金子康江・瀬田英憲 (1988), トカラ火山列島付近の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 6, 14-23.
- 林田政和・長岡信治・加藤茂・春日茂・小川正泰・瀬田英憲・内田摩利夫・河合晃司 (1989), 奄美海台東部の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 7, 25-38.
- 加藤幸弘・高梨政雄・金子康江・河合晃司 (1989), 奄美海台西部の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 7, 39-48.
- 登崎隆志・金子康江・毛戸勝政・堀井孝重・岩淵洋・小川正泰・河合晃司 (1989), 「火山列島」の大陸棚調査, *水路部技報*, 8, 72-80.
- 登崎隆志・金子康江・加藤幸弘・瀬田英憲・春日茂・河合晃司 (1989), 「小笠原海台」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 8, 81-84.
- 林田政和・高梨政雄・池田耕作・金子康江・加藤幸弘・小川正泰・春日茂 (1989), 「四国海盆中部」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 8, 85-91.
- 林田政和・金子康江・長岡信治・瀬田英憲・岡崎勇 (1989), 「西七島海嶺南部」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 8, 92-97.
- 林田政和・長岡信治・加藤幸弘・瀬田英憲・加藤茂・井本泰司・小川正泰 (1989), 「父島」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 8, 98-104.

- 池田耕作・金子康江・加藤幸弘・瀬田英憲・加藤茂・岡崎勇・岩渕洋・河合晃司(1989),「南西諸島海溝東部」の大陸棚調査, *水路部技報*, 8, 105-116.
- 山内明彦・登崎隆志・長岡信治・加藤幸弘・島川康江・林田政和・高梨政雄(1991),「西七島海嶺北部」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 9, 19-25.
- 篠美幸・池田清・登崎隆志・長岡信治・加藤幸弘・島川康江・瀬田英憲(1991),「膠州海山」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 9, 26-31.
- 木村信介・登崎隆志・長岡信治・山内明彦・林田政和・高梨政雄(1991),「四国南方」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 9, 32-38.
- 霜鳥史郎・加藤幸弘・沖野郷子・山内明彦・木村信介・林田政和・池田清・長岡信治(1992),「沖ノ鳥島北方」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 10, 60-66.
- 平尾昌義・沖野郷子・山内明彦・木村信介・登崎隆志・林田政和・篠美幸・池田清(1992),「沖大東海嶺」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 10, 67-73.
- 山崎誠一・平尾昌義・加藤幸弘・山内明彦・霜鳥史郎・登崎隆志・長岡信治・沖野郷子・篠美幸・木村信介(1992),「西マリアナ海盆北端部」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 11, 85-93.
- 山内明彦・春日茂・加藤幸弘・鶴沢良文・霜鳥史郎・寺井賢一・木村信介・沖野郷子・沖野陸登(1992),「小笠原海台北東方」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 11, 94-99.
- 鶴沢良文・春日茂・島村国雅・霜鳥史郎・沖野郷子・木村信介・沖野陸登・寺井賢一(1994),「伊豆・小笠原海溝南部」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 12, 94-100.
- 鬼丸 尚・春日茂・鶴沢良文・霜鳥史郎・山崎誠一・加藤幸弘・山内明彦・西澤あずさ・寺井賢一・平尾昌義(1994),「小笠原海台東端部北方」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 12, 101-107.
- 星野二郎・春日茂・林田政和・加藤幸弘・島村国雅・山崎誠一・霜鳥史郎・西澤あずさ・山内明彦・寺井賢一(1994),「小笠原海溝東端部」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 12, 108-114.
- 井上渉・春日茂・鬼丸尚・霜鳥史郎・星野二郎・島村国雅・林田政和・山崎誠一・鶴沢良文(1995),「沖ノ鳥島東方」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 13, 120-125.
- 霜鳥史郎・加藤幸弘・鬼丸尚・井上渉・山内明彦・島村国雅・林田政和・山崎誠一(1995),「南硫黄島南方」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 13, 126-132.
- 瀬田英憲・春日茂・星野二郎・井上渉・鶴沢良文・島村国雅・鬼丸尚・山崎誠一・霜鳥史郎(1996),「沖ノ鳥島」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 14, 36-43.
- 井上渉・大森哲雄・春日茂・島瀬勇二・瀬田英憲・星野二郎・飯塚正城・鬼丸尚・霜鳥史郎(1996),「沖ノ鳥島西方」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 14, 44-50.
- 飯塚正城・清水直哉・島瀬勇二・小原康彦・大森哲雄・岩渕洋・瀬田英憲・星野二郎・鬼丸尚(1997),「沖ノ鳥島南東方」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 15, 53-59.
- 飯塚正城・島瀬勇二・小原康彦・春日茂・大森哲雄・岩渕洋・清水直哉・瀬田英憲・星野二郎(1998),「沖ノ鳥島南方」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 16, 63-69.
- 西嶋静恵・内田摩利夫・楠勝浩・井上渉・飯塚正城・春日茂・星野二郎(1997),「沖大東島南方」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 16, 70-77.
- 井上渉・牛島学・楠勝浩・小原康彦・神田静恵・黒田義春・清水直哉・飯塚正城(1999),「沖大東海嶺南西方」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 17, 70-74.
- 牛島学・楠勝浩・小原康彦・神田静恵・大森哲雄・春日茂・黒田義春・清水直哉・星野二郎・飯塚正城・瀬田英憲(1999),「沖ノ鳥島南西方」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 17, 75-82.

- 中山正則・熊坂文雄・牛島学・春日茂・神田静恵・黒田義春・飯塚正城・内田摩利夫・星野二郎・山崎誠一・清水直哉・井上渉・楠勝浩(2000), 「沖縄島南方」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 18, 11-23.
- 杉山伸二・熊坂文雄・小原康彦・牛島学・春日茂・神田静恵・黒田義春・飯塚正城・内田摩利夫・星野二郎・山崎誠一・清水直哉・井上渉・楠勝浩(2000), 「宮古島南方」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 18, 24-35.
- 真角聡一郎・熊坂文雄・杉山伸二・牛島学・小川正泰・神田静恵・飯塚正城・中川正則・井上渉(2001), 「男女海盆」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 19, 23-29.
- 速見浩一・永蔵克己・阿部博・真角聡一郎・熊坂文雄・林田政和・杉山伸二・牛島学・鮫島真吾・池田俊一・神田静恵・打田明雄・小原康彦・飯塚正城・中川正則・山崎誠一・井上渉・及川幸四郎(2001), 「南鳥島西方」「南鳥島」「南鳥島東方」の大陸棚調査速報, *水路部技報*, 19, 30-50.
- Takemura, T., Yanagi, T., Ganeko, Y. (1971), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 6, 19.
- Takemura, T., Yanagi, T., Tomioka, Y. (1972), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 7, 23.
- Takemura, T., Yanagi, T., Nisiya, S. (1974), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 8, 29.
- Takemura, T., Yanagi, T., Tomioka, Y. (1975), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 9, 42.
- Yanagi, T., Tomioka, Y., Katsuno, K. (1976), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 10, 49.
- Yanagi, T., Tomioka, Y., Katsuno, K. (1977), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 11, 76.
- Ganeko, Y., Yanagi, T., Kubo, K. (1978), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 12, 55.
- Yanagi, T., Matsumoto, K., Nisisita, A. (1979), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 13, 48.
- Ganeko, Y., Yanagi, T., Nisisita, A. (1980), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 14, 59.
- Ganeko, Y., Harada, Y., Komatu, Y. (1981), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 15, 44.
- Ganeko, Y., Harada, Y., Komatu, Y. (1982), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 16, 64.
- Ganeko, Y., Harada, Y., Koyama, K., Fitinoue, S. (1983), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 17, 88.
- Ganeko, Y., Harada, Y., Koyama, K., Hiraiwa, T. (1984), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and

水路部観測報告の参考文献

Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy

Tokuhiro, A. (1996), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 1, 43.

Tokuhiro, A. (1967), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 2, 29.

Sugimoto, K., Yanagi, T. (1968), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 3, 22.

Takemura, T., Yanagi, T., Ganeko, Y. (1969), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 4, 13.

Takemura, T., Yanagi, T., Ganeko, Y. (1970), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 5, 33.

- geodesy, 18, 85.
- Ueda, Y., Harada, Y., Hiraiwa, T. (1985), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 19, 99.
- Ueda, Y., Harada, Y., Horii, R., Hiraiwa, T. (1986), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 20, 90.
- Ueda, Y., Asao, T. Hiraiwa, T. (1987), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 21, 122.
- Ueda, Y., Nakagawa, H., Onodera, K., Nagaya, Y. (1988), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 22, 36.
- Yanagi, T., Onodera, K., Ito, H., Kato, T. (1989), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 23, 34.
- Yanagi, T., Mihara, S., Yamano, H. (1990), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 24, 63.
- Yanagi, T., Mihara, S., Yamano, H. (1991), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 25, 40.
- Ono, F., Mihara, S., Okumura, M. (1992), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 26, 44.
- Ono, F., Mihara, S., Kato, T., Usijima, M. (1993), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 27, 44.
- Ono, F., Kato, T., Usijima, M. (1994), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 28, 52.
- Kato, T., Usijima, M., Tugawa, T. (1995), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 29, 64.
- Okumura, M, and Toyama, S. (1997), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 31.
- Okumura, M, and Toyama, S. (1998), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 32.
- Suzuki, A., and Sakamoto, H. (1999), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 33.
- Suzuki, A., and Sakuma, K. (2000), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 34.
- Kato, T., and Suzuki, A. (2001), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 35.
- Kato, T. (2002), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 36.
- Kato, T. (2003), Data report of Hydrographic Observation, series of astronomy and geodesy, 37.

海底地殻変動観測における局位置解析手法と精度の向上について †

石川直史, 藤田雅之

Inverse method and precision improvement for seafloor positioning

Tadashi ISHIKAWA and Masayuki FUJITA

Abstract

For the precise GPS/Acoustic seafloor positioning, we are developing an analysis software, which combines a kinematic GPS result and an observed acoustic travel time to get a precise position of an array of seafloor stations. We summarize the method of this analysis, especially focusing on estimation of underwater sound velocity structure. In this analysis, vertical coordinates of seafloor stations and the sound velocity are not completely independent. Therefore vertical coordinates are greatly influenced by the error of sound velocity and in consequence their precision is more deteriorated than that of horizontal coordinates. So we present a new analysis strategy for precision improvement. In this strategy the vertical coordinates are no longer estimated values, but are fixed at known values. This strategy improves the estimation of sound velocity. As a result, the precision of estimated coordinates of seafloor stations got improved for the horizontal components.

1. はじめに

海上保安庁海洋情報部では, 東京大学生産技術研究所との技術協力の下, GPS 音響結合方式による海底地殻変動観測の技術開発 (浅田・矢吹, 2001; 矢吹, 2002) 及び海底基準点の展開を行っている. 現在まで, 主に日本海溝及び南海トラフ沿い陸側に十数点の海底基準点を設置し, 各点で測量船によるキャンペーン観測を繰り返し実施している (海上保安庁海洋情報部・東京大学生産技術研究所, 2002; Mochizuki et. al., 2003). また, これらの観測を進めていく中で現れる, 様々な技術上・運用上の問題点を改善することにより, センチメートルレベルの観測精度を目指している

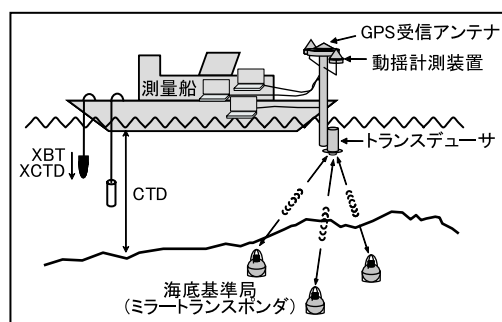


Fig.1: Schematic figure of the observation system.

(畝見, 2004).

観測システムの概念図を Fig.1 に示す. このシステムは長基線キネマティック GPS (KGPS) 測位と海中の音響測距を組み合わせ, 海底に設置した基準局の位置を, 船を介して精密に測定するも

† Received
航法測地室 Geodesy and Geophysics Office

のである。

現在、我々は海底基準局の位置を求める局位置解析のためのソフトウェア「SGOBS (Seafloor Geodetic OBServation)」の開発を行っている。本稿ではこの局位置解析について、現在用いている手法と精度向上のために行っている試みについて報告する。

2. 解析手法

(1) 概要

本観測におけるデータ解析は、大きく三つのプロセスに分けられる。一つ目は船の位置を求めるキネマティック GPS (KGPS) 解析、二つ目は船と海底局間の音波の往復走時を求める音響測距解析、そして三つ目が前二者の結果を結合して海底局位置を求める局位置解析である。全体の解析の流れを Fig.2 に示す。

KGPS 解析には、長距離基線解析のために開発されたソフトウェア IT (Colombo, 1998) を、音響測距解析には、相関波形処理による手法 (浅田・矢吹, 2001; 富山, 2003) を用いている。最終的に行う局位置解析には藤田他 (2004) によるソフトウェア SGOBS を用いている。

SGOBS での解析に用いるデータは、KGPS 解析から得られた GPS アンテナ位置、音響解析から得られた音波走時、動揺計測パラメータ、及び CTD, XCTD, XBT から得られた海中の音速度構造プロファイルである。

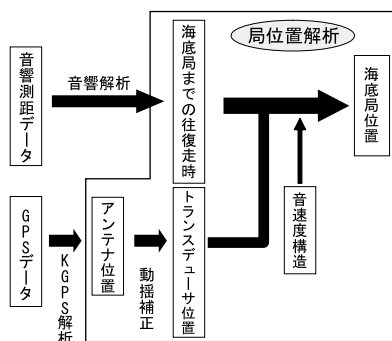


Fig.2: Flow chart of analysis.

まず GPS アンテナ位置と動揺計測パラメータから、観測支柱のもう一端に取り付けてあるトランスデューサの位置を求める。このトランスデューサ位置と音波走時から、音速度構造を介して、幾何学的原理に基づき海底局位置を決定する。その際、ベイジアン最小二乗法に基づくインバージョン法を適用している (松浦, 1994)。

(2) 音速度構造の推定

海底局位置を精密に求めるには、要求精度内で正確な音速度構造を与える必要がある。通常の観測では、1日の測距観測の前後にCTD観測を行い、測距観測中には約1時間ごとにXBT、又はXCTDによる観測を行っているが、これらの観測機器の精度は十分であるとは言えない。また、音速度構造は時間・空間で変化するため、その変化全てを観測でカバーするのは不可能であると言ってよい。さらに、観測値から音速度を求める経験式 (例えば、Del Grosso, 1974; Wilson, 1962; Chen and Milleo, 1977) の選択によっても有意な差が生じてしまうことになる。以上のことから、観測値に基づく音速度構造のみから数 cm レベルの高精度測位を行うことは極めて困難であると言える。

しかしながら、音波走時は距離と速度の関数なので、走時データは距離の情報だけではなく伝播経路の音速度構造の情報も含んでいる。そこでSGOBSでは、観測値から得られた音速度構造の値をそのまま使うのではなく、平均音速度の時間変化係数を推定パラメータとしている。つまり、局位置解に加え、音速度構造も解として解くことによって、誤差の軽減を試みている。これはGPS測位で行われている大気遅延量の推定などと同様の考えである。

以上に基づく具体的なパラメータ推定手順は以下のとおりである。我々の海底基準点では、通常1点につき4つの海底基準局を東西南北に配置し、観測を行っているが、まず、これら複数の海底局について、同一の音速度構造で局位置解を求める。次にその残差データを用いて、一定の時間ウィンドウごとに音速度の時間変化を求める。こ

のサイクルを局位置解が収束するまで繰り返し、最終的な局位置解を決定している（藤田他，2004）。

音速度構造の推定手法として、平均音速度の時間変化を以下のように2次式で表し、その係数をモデルパラメータとしている。

$$V(t) = V(t_0) + a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2 \quad (1)$$

ここで t_0 は基準時刻、 $V(t_0)$ は t_0 における音速度初期値である。

しかしながら、現実の音速度変化は複雑であり、これをある特定の関数にあてはめて補正することには限界がある。そこで、現行バージョンでは以下のような手順に従って音速度補正を行っている。

- ・まず、観測から得られた音速度構造プロファイルを初期値として、1日単位の2次回帰式の各補正係数について補正值を求める。
- ・これにより求められた音速度構造を改めて初期値として、各測線単位の短い時間ウィンドウ内で2次回帰する。

この手法の考え方は、最初に1日単位でのバイアス的な補正を行った後、1日の変化について2次式で補正しきれない部分を測線単位の推定で補おうとするものである。なお、ここで入力値として与える音速度プロファイルはCTD、XCTD、及びXBTの観測値からDel Grosso (1974) の式で計算したものを基に、1日単位の時間変化を2次式で回帰したものを用いる。

3. データサブセットによる再現性の評価

海底基準点の測位精度を評価するため、藤田・佐藤 (2004) は、宮城県沖海底基準点における1

回のキャンペーン観測で取得した全データをいくつかのサブセットに分け、各サブセットから得られた独立の測位解の再現性を吟味した。ここでは同様の方法により、同じく宮城県沖のデータを用いた精度評価結果を示し、これについて詳しく考察する。

(1) 宮城県沖海底基準点の結果

Table 1 に、宮城県沖海底基準点において2004年4月24日～5月7日の期間に行った、8日間のキャンペーン観測で得られたデータ数を、Fig.3 に、それぞれ1日ごとのサブセット解を比較した結果を示す。

図のプロットは、それぞれ東西・南北・鉛直成分について、4台の海底局の平均位置を全日解（基

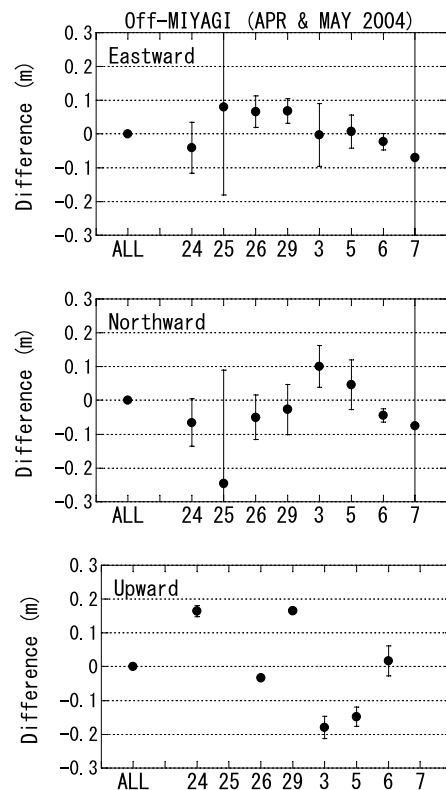


Fig.3 : Repeatability of seafloor positioning at Off-Miyagi reference point at the epoch Apr & May, 2004.

Table 1 : Number of data for Off-Miyagi reference point at the epoch Apr & May, 2004.

日付	4/24	4/25	4/26	4/29	5/3	5/5	5/6	5/7
測線数	12	7	9	14	10	12	14	9
データ数	1241	693	935	1456	1315	1248	1456	936

準位置)からの差としてプロットしている。エラーバーは各海底局の基準位置からの差の二乗平均値で、海底局間の相対位置関係のばらつきを示す指標である。

Fig.3 から、1 日ごとのサブセット解について、水平成分では、全観測日でほぼ 10cm 以内、エラーバーの大きい 4 月 25 日と 5 月 7 日を除けばほぼ 5cm 以内の再現性が得られている。一方、鉛直成分では、20cm 以上ものばらつきがあり、鉛直成分の位置決定精度が水平成分に比べて低いことがわかる。こうした傾向はこのキャンペーンエポックに限らず他のエポックでもみられ、水平成分に比べて鉛直成分のばらつきが大きい、つまり位置決定精度が低いということが一般的に言える。

(2) 考察

この測位技術では、音速度構造の誤差が海底局位置決定の大きな誤差要因となっている。佐藤・藤田 (2004) は、数値実験により、水平方向に関しては、音速度構造に誤差があったとしても、データが各方位に対称に分布していれば、ある程度は相殺されるが、鉛直方向に関してはデータを上下対称に取ることは不可能であるため、音速度誤差の影響が局位置解に顕著に現れることを示した。

本解析手法では、音速度構造誤差を小さくするために音速度を推定パラメータとしているが、この推定の際、取得したデータの中に局位置と音速度構造を要求精度内で分離できるだけの情報が含まれているかどうか、が問題となる。この観点からみると、我々の観測データは、上述のように鉛直方向に対してデータ配置の偏りがあるため、局位置解の鉛直成分と音速度の補正パラメータの解が分離しにくい傾向がある。Fig.3 にみられる鉛直成分の決定精度の低下は、これらの理由によるものと考えられる。

次に、8 日間の測位解のうち、Fig.3 において水平成分のエラーバーが最も大きい 5 月 7 日の結果について、詳しく検討する。同日の鉛直成分の全

日解との差は、約 -1.2m であり、この図ではスケールアウトしている。

この原因を考えるため、Fig.4 に 5 月 7 日の測線分布を、Fig.5 に、4 台の海底局位置 (N, S, W, E) 及び、それら 4 局の平均位置 (REF) のそれぞれについて、全日解で求められた位置との差を示す。

Fig.5 では、4 局の平均位置 (REF) の水平成分の全日解との差は、10cm 程度に収まっている。

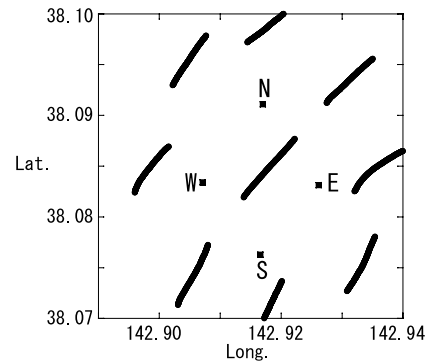


Fig.4 : Observation lines and distribution of the seafloor stations.

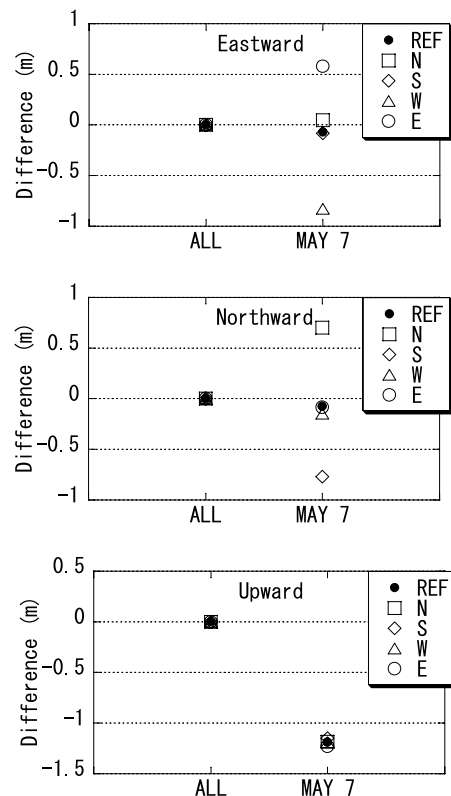


Fig.5 : Difference of positioning result between all day data and May 7 data.

一方、各海底局別にみると、全日解に比べ大きな差が現れていることがわかる。

東西に配置した海底局については、南北成分は10cm以内の差であるものの、東西成分は50cm ~ 1m 近くの大きな差を持っており、東の局(E)は東へ、西の局(W)は西へ大きくずれてしまっている。南北に配置した海底局については、これとは逆の結果で、北の局(N)は北へ、南の局(S)は南へ大きくずれている。また、鉛直成分については4局ともに、全日解よりも約1.2m 深くずれている。

このように各海底局が大きなずれをみせている原因として、5月7日の推定音速度に大きな誤差が含まれていることが考えられる。このような誤差の影響は、データの配置に大きく依存している。

例えば北の局(N)については、Fig.4 から、東西方向にはデータが対称に分布しているため誤差の影響が相殺されるものの、南北方向に関しては、南側にデータが偏っているため、誤差の影響を相殺しきれず、解がずれてしまっていると考えられる。他の局についても同様で、データ分布が偏っている方向に解がずれている。特に、データを対称に取ることが不可能な鉛直成分に、この影響が顕著に現れ、4局全てが大きなずれをみせている。

また、4局の平均位置(REF)が、東西・南北ともに全日解とのずれが少なく留まり、相対的に良い結果を与えている理由は、Fig.4 にみられるデータ分布が、4局の中心に対してほぼ対称にバランス良く配置されていることによると考えられる。

このように Fig.5 における、各海底局の大きなずれは、推定音速度が真値よりも大きな値になっていると考えることによって説明が可能になる。これは佐藤・藤田(2004)の数値実験の結果を実例で示すものである。

さらに、5月7日の解析で推定された音速度パラメータについて、具体的にみしてみる。Fig.6 は、同日の推定された音速度の時間的な変化曲線を示

している。図中、SV0 は初期値、SV1 は1日補正值、SV2 は測線ごとの補正值である。この図から、SV0 から SV1 の間に、約0.4m/s もの大きなバイアスの補正があり、最終的な結果である SV2 は SV1 に近い値となっていることがわかる。

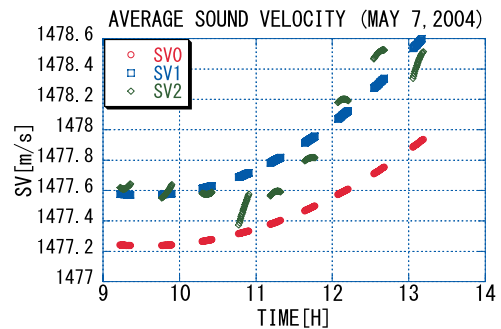


Fig.6 : Temporal variation of sound velocity on 7 May, 2004.

この結果だけでは、SV0 と SV1 のどちらが真値に近いのかは判断できないが、上述の測位結果比較を踏まえると、初期値である SV0 の方がより真値に近く、音速度の推定の際、SV1 が大きくずれてしまったと考えるのが妥当である。

この例の場合、解析後の走時残差を小さくするため、音速度を速くすることにより、無理矢理誤った値に収束させてしまい、その結果、海底局の推定位置が真値よりも、大幅に深くなってしまったものと考えられる。水平成分は鉛直成分に比べ、平均位置のずれは小さいものの、各局間のばらつき(Fig.3 におけるエラーバー)は大きくなる。また水平方向にもある程度のデータ分布の偏りがあるため、音速度の誤差が大きくなれば、水平成分も精度低下を免れない。

4. 海底局の高さを固定することによる精度向上

前節では、鉛直成分と音速度とのパラメータ分離が悪いことにより、相対的に鉛直成分の測位精度が悪くなり、極端な場合には、本来精度向上のために行っているはずの音速度パラメータの推定が、逆に精度低下をも引き起こしてしまう可能性

があることが示唆された．そこで，この問題を解消するための新しい解析ストラテジーを提示する．

(1) 局位置の鉛直成分を固定する解析手法

新たな解析ストラテジーとして，局位置の鉛直成分を既知として固定する方法について検討する．既に述べたように，局位置解の鉛直成分と音速度パラメータの分離が悪いため，鉛直成分の値を固定することにより，音速度をより正しく推定することができると思われる．

Fig.7 に，Fig.3 と同じ宮城県沖海底基準点のデータについて，鉛直成分を固定した場合の局位置解析結果の水平成分を示す．

ここで固定した鉛直成分の値は，これまでの2年間に行ってきた宮城県沖の解析結果から，最も妥当だと思われる値を用いた．これについては後で述べる．

Fig.3 と比べてみると，ほぼ全ての日についてエラーバーが大きく減少している．すなわち，4つの海底局間の相対位置のばらつきが小さくなっていることがわかる．また，平均位置の再現性についても，明らかな改善がみられる．特に5月7日の結果については，双方に大きく改善されていることがわかる．

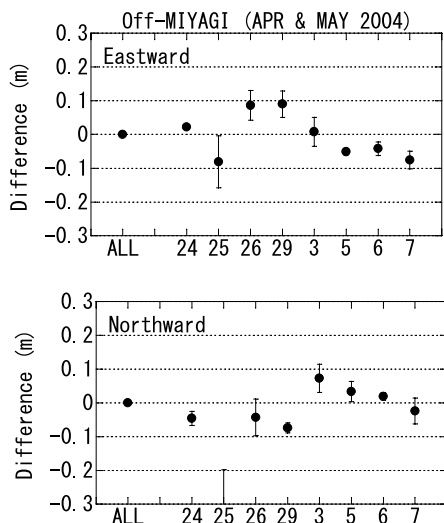


Fig.7 : Repeatability of seafloor positioning at Off-Miyagi reference point at the epoch Apr & May, 2004 using height constraint.

既にみたように，相対位置のばらつきが大きいことは音速度の誤差が大きいことを示唆しており，鉛直成分を固定する手法によりエラーバーが減少したことは，この手法の音速度推定の誤差を軽減する手段としての有効性を示している．

ただし，4月25日の結果は，この手法による改善がみられない．これについては，データ数の不足，データ配置の不均質，音速度の空間的な不均質など別の原因を考えなければならない．

最後に，鉛直成分を固定した場合の5月7日の音速度の推定結果を Fig.8 に示す．Fig.6 とは明らかに異なり，音速度の推定結果が観測値に近く求められている．このことは，前節で述べた判断を裏付けるものである．

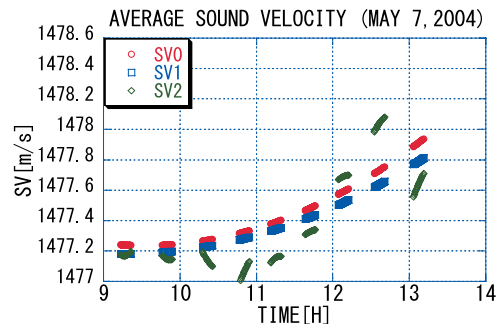


Fig.8 : Temporal variation of sound velocity on 7 May, 2004 using height constraint.

(2) 鉛直成分の固定値の誤差の影響

今回用いた局位置の鉛直成分の固定値は，宮城県沖における過去の解析結果から，最も妥当と判断した2002年5月の観測エポックの推定値である．しかしながら，この値にも，ある程度の誤差があると考えなければならない．

そこで，固定する鉛直成分の誤差の影響をみるために，固定値を変化させ，水平線分の推定結果への影響について調べた．Fig.9 は，固定値を±20cmまで変化させた場合の全日解水平成分を比較したものである．図から，この範囲で見ると，平均位置にはほとんど影響がないことがわかる．

この結果から，データ分布の対称性には注意する必要があるものの，現状の精度で平均位置を議

論する限り，海底局位置の鉛直成分は 10cm 程度の精度で与えれば十分であると考えられる．また実際に考える定常的な海底の地殻変動による僅かな高さの変化も，水平成分の結果にはほとんど影響はないと言える．ただし，この手法の適用は，地震や火山活動に伴う変動等，大きな鉛直方向の変位が予測される場合には十分注意する必要がある．

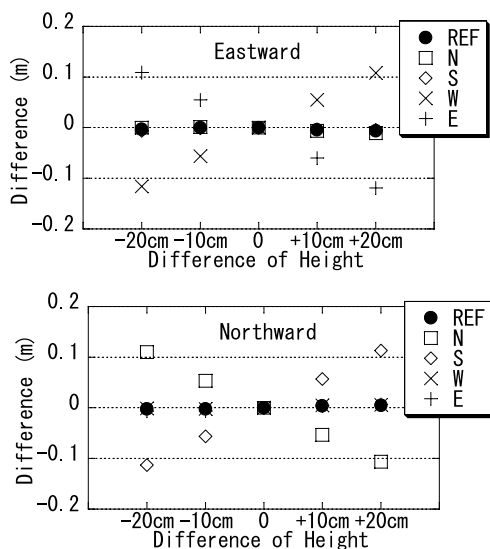


Fig.9 : Comparison of positioning result at difference of height values.

5. まとめ

海底地殻変動観測における海底局位置の決定精度について検証した結果，鉛直方向の決定精度は水平方向に比べて低い傾向にあることがわかった．その原因として，データ分布の偏りから，局位置解の鉛直成分は音速度と分離しにくく，音速度の誤差の影響を受けやすいことが考えられる．

現在，我々が用いている解析手法では，音速度を推定パラメータとして補正し，局位置推定誤差の軽減に努めているものの，十分には補正しきれていない場合がある．また，データに含まれる何らかの別の要因を音速度構造に押しつけて，音速度を誤って推定してしまう可能性もある．これらの要因が局位置解の鉛直成分の推定に影響を与え，精度低下を引き起こしていると考えられる．

水平成分に関しては，データ分布をバランス良く対称とすることで，音速度誤差の影響をある程度小さくすることができるものの，誤差が大きくなった場合には精度低下は免れない．

そこで，新たな解析ストラテジーとして，局位置の鉛直成分を既知の値に固定する方法を示した．2004年4月～5月に宮城県沖海底基準点で取得した8日間のデータにこの手法を適用したところ，従来の手法に比べサブセット解のばらつき，エラーバーともに小さくなり，精度が向上する結果が得られた．これは，局位置の鉛直成分を正しい値に固定することにより，音速度の推定精度が向上し，その結果，局位置の水平成分の決定精度も向上したと考えられる．

本研究で示した手法は，海底地殻変動観測における当面の目標である水平変動の把握のために大変有効な方法である．しかしながら，地震や火山活動のみならず定常変動においても，鉛直成分の変動もまた非常に重要な情報であり，将来的には，海底局の位置を3次的に精度良く決定することも目標としたい．

謝 辞

本研究は，海上保安庁の海底地殻変動観測プロジェクトに関わっている航法測地室衛星測地担当職員，及び矢吹哲一郎，富山新一，片山真人，佐藤まりこの各氏，測量船「海洋」「明洋」乗組員，東京大学生産技術研究所の浅田昭，望月将志，吉田善吾の各氏ら，多くの方々の協力の下に行われた．記して感謝する．

要 旨

海底地殻変動観測における海底局位置を決定するための解析ソフトウェア SGOBS では，音速度の誤差の影響を軽減するため，局位置のほかに音速度のパラメータを推定することにより位置決定精度の向上を図っている．しかしながらこの方法では，局位置解の鉛直成分と音速度が分離しにくいため，鉛直成分の決定精度が水平成分に比べて悪くなる傾向にある．さらに，場合によっては大

きく音速度の推定を誤り，水平成分の決定精度を逆に劣化させる場合がある．そこで新たな解析ストラテジーとして，鉛直成分を既知として固定する手法を示した．これを宮城県沖海底基準点の2004年4月～5月のキャンペーンデータに適用することにより，手法の有効性について検証した．その結果，鉛直成分を固定することによって，音速度がより正確に補正され，水平位置の決定精度が向上することが示された．

参 考 文 献

- 浅田昭，矢吹哲一郎（2001）：熊野トラフにおける長期地殻変動観測技術の高度化，地学雑誌，110（4），529-543.
- Chen, C. T. and F. J. Milleo (1977) : Speed of Sound in seawater at height pressures, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 62, No.5, 1129-1135.
- Colombo, O. L. (1998) : Long-Distance Kinematic GPS, in “*GPS for Geodesy 2nd edition*”, Springer, 537-568.
- Del Grosso, V. A. (1974) : New Equation for Speed of Sound in Natural Water (with comparison to other equations), *The Journal of the Acoustical Society of America*, 56, No.4, 1084-1091.
- 藤田雅之，佐藤まりこ，矢吹哲一郎（2004）：海底地殻変動観測における局位置解析ソフトウェアの開発，海洋情報部技報，22，42-49.
- 藤田雅之，佐藤まりこ（2004）：海底地殻変動観測における局位置決定再現性の評価，海洋情報部研究報告，40，85-92.
- 海上保安庁海洋情報部，東京大学生産技術研究所（2002）：海上保安庁海洋情報部の海底地殻変動観測，地震予知連絡会会報，68，557-565.
- 松浦充宏（1994）：インバージョン解析法，「現代測地学」日本測地学会，477-482.
- Mochizuki, M., M. Sato, M. Katayama, T. Yabuki, Z. Yoshida and A. Asada (2003) : Construction of Seafloor Geodetic Observation Network Around Japan, *Recent Advances in Marine Science and Technology*, 2002, 591-600.
- 佐藤まりこ，藤田雅之（2004）：海底地殻変動観測における海中音速度誤差の局位置への影響について，海洋情報部技報，22，42-49.
- 富山新一（2003）：海底地殻変動観測における音響解析，海洋情報部技報，21，67-72.
- 畝見潤一郎（2004）：海底地殻変動観測の現状と諸問題について，海洋情報部技報，22，33-41.
- Wilson, W. D. (1962) : Extrapolation of the Equation for the Speed of Sound in Sea Water, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34, No.6, 866.
- 矢吹哲一郎（2002）：海底地殻変動観測を目指した音響技術開発，水路部研究報告，38，47-58.

東京湾海底堆積物中における POPs (残留性有機汚染物質) 濃度分布の特徴について †
(平成 14 年東京湾 POPs 調査結果より)

清水潤子⁽¹⁾, 山尾 理⁽¹⁾, 野坂琢磨⁽²⁾, 野口賢一⁽²⁾, 峯 正之⁽²⁾,
松本敬三⁽³⁾, 大市一芳⁽⁴⁾, 堤 一尚⁽⁵⁾, 宮本哲司⁽⁶⁾, 池田善郎⁽⁷⁾

Distributions of Sedimentary POPs (Persistent Organic Pollutants) in Tokyo Bay
- Results from the Survey of POPs in Tokyo Bay in 2002.

Junko SHIMIZU ⁽¹⁾, Satoshi YAMAOKA ⁽¹⁾, Takuma NOSAKA ⁽²⁾, Ken-ichi NOGUCHI ⁽²⁾,
Masayuki MINE ⁽²⁾, Keizo MATSUMOTO ⁽³⁾, Kazuyoshi OICHI ⁽⁴⁾,
Kazunao TSUTSUMI ⁽⁵⁾, Tetsuji MIYAMOTO ⁽⁶⁾ and Yoshiro IKEDA ⁽⁷⁾

Abstract

In 2002, vertical and horizontal distributions of POPs in Tokyo Bay were surveyed by Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard. The samples were analyzed about thirteen kinds of POPs. The sedimentation dating of core samples were analyzed based on ²¹⁰Pb measurements.

In the horizontal distributions of POPs, most of substances show the highest concentration points on the head of the bay, next higher points were on the entrance of the bay, and the lowest points were near the Naka-no-se and Uruga-Suido traffic routes. The concentrations of each substance on the head of Tokyo Bay were compared. PCBs and most of the substances show the higher concentration in the west part than the east part of the bay. On the other hand some components of Dioxins, PCDDs and PCDFs, show the higher concentrations in the east part than the west part. Characteristics of these surface distributions are considered to be related to the source of the substances and/or the sedimentation environment such as the grain size.

Historical trend of POPs was considered from the vertical distributions of POPs' concentration. The concentrations of PCBs and most of the substances began rising at 1950s, showing the peak near 1970, and then lowering until today. The concentration of Chlordanes showed the peak at 1980s, and relatively high concentrations were kept until today. The concentration of HCB began rising at 1950s, and relatively high concentrations were kept until today. The historical trends of the concentrations were considered to be reflected the terms of use and/or discharge of each substance.

† Received

⁽¹⁾ 海洋研究室 Ocean Research Laboratory

⁽²⁾ 海洋汚染調査室 Marine Pollution Research Laboratory

⁽³⁾ 海洋調査課 Hydrographic Survey Division.

⁽⁴⁾ 海洋情報課 Oceanographic Data and Information Division.

⁽⁵⁾ 総務部秘書課 Administration Department

⁽⁶⁾ 第三管区海上保安本部海洋情報部 3rd Regional Coast Guard Headquarters

⁽⁷⁾ 国土環境株式会社 METOCEAN ENVIRONMENT INC.

1. はじめに

POPs (Persistent Organic Pollutants ; 残留性有機汚染物質) とは , 一般に ,

- (衡) 毒性 : 人の健康又は環境に対する悪影響
- (衫) 難分解性 : 環境中で分解しにくい性質
- (袁) 生物蓄積性 : 生物や体内に蓄積されやすい性質
- (袞) 長距離移動性 : 大気 , 水 , 移動性の生物種を通じて国境を越えて長距離を移動しやすい性質

といった特性を持つ化学物質を指す (環境省環境保健部 , 2002) .

POPs から人の健康と環境を保護することを目的として , 2001 年 5 月に「残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約」(以下「POPs 条約」と略す)が採択され , 2004 年 5 月に発効した . 日本は同条約について 2002 年 8 月に締結している . 条約では , 各国が講ずべき対策として 製造 , 使用禁止及び原則制限 , 非意図的生成物の排出の制限 , 在庫 , 廃棄物の適正管理及び処理 , ~ についての国内実施計画策定 , その他の措置として , 新規 POPs の製造や使用を予防するための措置 , POPs に関する調査研究・モニタリング・情報提供・教育 , 及び途上国に対する技術・資金援助の実施等が挙げられている .

POPs 条約では現在のところ , 12 物質を条約中の付属書 A , B , C によって指定している (第 1 表) . 付属書 A はアルドリンなどの殺虫剤や , 工業製品である PCB など , 廃絶を目指す物質を指定している . 付属書 B は , 使用を制限する物質を指定しており , マラリアの予防のために登録された地域での使用が認められている DDT がこれに当たる . 付属書 C は非意図生成物で削減に取り組むべきものを指定しており , 燃焼や工業活動の熱的過程などで生成するダイオキシン類などがこれに当たる . これらの物質に関して日本では , 「化学物質の審査及び規制に関する法律」(以下「化審法」と略す) , 「特定化学物質の環境への排出量の把握

等及び管理の改善の促進に関する法律」 , 「ダイオキシン類対策特別措置法」など , すべて国内法により管理の対象とされている .

POPs のモニタリングとして , 大気 , 水質 , 水底底質 , および生物中の POPs 濃度について , 環境省が POPs 条約締結の年である平成 14 年 (2002 年) 度から統一的な方法で全国的な調査を始めている . この環境省による POPs モニタリングについては , 試料採取や分析の方法の検討を同時に行いながらであるが , 国内における POPs 汚染の状況を検討するのに足るレベルのデータが集まりつつあるところである (柴田他 , 2004) .

ところで POPs 条約採択以前にも , 条約指定 POPs のうち一部の物質についてはモニタリングが行われていた . 当庁では昭和 47 年 (1972 年) から 12 物質の一つである PCB について , 我が国周辺海域の調査を行っている (海上保安庁海洋情報部 , 2004) . また , DDT , クロルデン等については , 環境省がとりまとめをしている「化学物質環境汚染実態調査」(以下黒本調査という)において , 土壌 , 水質 (海域を含む) , 水底の底質における調査結果が昭和 61 年から報告されている (環境省 , 2004) . しかしながら環境省による黒本調査や POPs モニタリング調査における海域の底質調査は , 河口と港湾域などごく沿岸の調査点の表層濃度のみで行われている . POPs の中でも , ダイオキシン類と PCB については , 比較的調査例が多く , 東京湾全域における調査の結果も報告されて

第 1 表 POPs 条約対象物質

Table 1. Substances listed in Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants

POPs条約中での指定	物質名
付属書A記載物質 (製造、使用の原則禁止)	アルドリン、ディルドリン、エンドリン、 クロルデン、ヘプタクロル、トキサフェン、 マイレックス、ヘキサクロロベンゼン(HCB)、 ポリ塩化ビフェニル(PCB)
付属書B記載物質 (製造、使用の原則制限)	DDT
付属書C記載物質 (排出の削減)	ポリ塩化ジベンゾーパラージオキシン(PCDDs)、 ポリ塩化ジベンゾフラン(PCDFs)、 ヘキサクロロベンゼン(HCB)、 ポリ塩化ビフェニル(PCB)

隔で分割し、同一深度のものを混合して POPs 分析用試料とした。表層試料はスミスマッキンタイヤ式採泥器（バケット部の表面積 32 × 35cm、深さ 17cm）を用い、堆積物の表層 5cm を分取した。得られた堆積物試料は褐色ガラス瓶に密封し、船上で - 40 の冷凍庫に入れ、分析まで冷凍状態で保存した。

2 - 2 . 試料の分析

(1) 鉛-210 法による堆積年代の測定

TP-1 ~ TP-8 で採取された各堆積物コアについて 5cm 刻みで 12 層の試料を分析に用いた。各層について鉛-210 濃度、含水率、強熱減量及び土粒子の密度を測定した（環境庁水質保全局水質管理

課，1988；松本，1986）。

鉛-210 濃度については、低バックグラウンドガスフローカウンターを用いて 24 時間 線計測により堆積物中の放射性鉛-210 (²¹⁰Pb) 濃度を決定した。含水率及び土粒子の密度から、積算重量深度と平均重量堆積速度を求めた。積算重量深度とは面積あたりの堆積物粒子の積算重量であり、g/ cm² 単位で表記する。平均重量堆積速度とは堆積物粒子が単位面積及び時間あたりに堆積する重量であり、g/cm²/year 単位で表記する。鉛-210 濃度は堆積物層が深くなるにつれて減少するが、鉛-210 濃度が一定となった値を各点毎の鉛-210 のバックグラウンド値とした。各層の鉛-210 濃度からバックグラウンド値を差し引いた濃度を過剰

第 3 表 POPs 測定項目、クリーンアップスパイク及びシリンジスパイク

Table 3. List of POPs investigated, clean-up spikes and syringe spikes

分析項目	詳細化合物	クリーンアップスパイク	シリンジスパイク
アルドリン	アルドリン (Aldrin)	¹³ C-Aldrin	
ディルドリン	ディルドリン (Dieldrin)	¹³ C-Dieldrin	¹³ C-PCB #70
エンドリン	エンドリン (Endrin)	¹³ C-Endrin	
クロルデン	cis-クロルデン (cis-Chlordane)	¹³ C-trans-Chlordane	
	trans-クロルデン (trans-Chlordane)	¹³ C-trans-Chlordane	¹³ C-PCB #111
	オキシクロルデン (oxy-Chlordane)	¹³ C-oxy-Chlordane	
	cis-ノナクロル (cis-Nonachlor)	¹³ C-cis-Nonachlor	¹³ C-PCB #178
	trans-ノナクロル (trans-Nonachlor)	¹³ C-trans-Nonachlor	¹³ C-PCB #111
ヘプタクロル	ヘプタクロル (Heptachlor)	¹³ C-Heptachlor	
	cis-ヘプタクロルエポキシド(cis-Heptachlorepoxyde)	¹³ C-cis-Heptachlorepoxyde	
	trans-ヘプタクロルエポキシド(trans-Heptachlorepoxyde)	¹³ C-cis-Heptachlorepoxyde	
ヘキサクロロベンゼン	ヘキサクロロベンゼン (HCB)	¹³ C-HCB	
DDT	o,p'-DDD	p,p'-DDD-d体	
	p,p'-DDD	p,p'-DDD-d体	
	o,p'-DDE	¹³ C-p,p'-DDE	
	p,p'-DDE	¹³ C-p,p'-DDE	¹³ C-PCB #111
	o,p'-DDT	¹³ C-o,p'-DDT	
	p,p'-DDT	¹³ C-o,p'-DDT	
マイレックス	マイレックス (Mirex)	¹³ C-Mirex	
ヘキサクロロシクロヘキサン	α-HCH	¹³ C-α-HCH	
	β-HCH	¹³ C-β-HCH	
	γ-HCH	¹³ C-γ-HCH	
	δ-HCH	¹³ C-β-HCH	
トキサフェン	トキサフェン (Toxaphene) (parar26,50,62)	¹³ C-trans-Chlordane	¹³ C-PCB #194
ポリ塩化ビフェニル	1塩素化PCB (MoCB)	¹³ C-PCB #3 (IUPAC番号、以下同じ)	¹³ C-PCB #70
	2塩素化PCB (DiCB)	¹³ C-PCB#8及び#15の平均	¹³ C-PCB #111
	3塩素化PCB(TriCB)	¹³ C-PCB #28、#31及び#37の平均	
	4塩素化PCB(TeCB)	¹³ C-PCB #52、#77及び#81の平均	¹³ C-PCB #70
	5塩素化PCB(PeCB)	¹³ C-PCB #95、#101、#105、#114、#118、#123及び#126の平均	¹³ C-PCB #111
	6塩素化PCB(HxCB)	¹³ C-PCB #153、#156、#157、#167及び#169の平均	¹³ C-PCB #138
	7塩素化PCB(HpCB)	¹³ C-PCB #170、#180及び#189の平均	
	8塩素化PCB(OoCB)	¹³ C-PCB #194及び#202の平均	¹³ C-PCB #178
	9塩素化PCB(NoCB)	¹³ C-PCB #206	
	10塩素化PCB(DeCB)	¹³ C-PCB #209	¹³ C-PCB #138
ダイオキシン類	ポリ塩化ジベンゾ-パラジオキシン(PCDDs)の4~8塩化物		
	ポリ塩化ジベンゾフラン(PCDFs)の4~8塩化物		
	コプラナーPCB (Co-PCBs) 12種	詳細化合物とクリーンアップ及びシリンジスパイクは第4表に記載	

第4表 POPs測定項目(ダイオキシン類詳細), クリーンアップスパイク及びシリンジスパイク
Table 4. List of POPs investigated (congeners PCDDs, PCDFs, and Co-PCBs), clean-up spikes and syringe spikes

	PCDDs	クリーンアップスパイク	シリンジスパイク
四塩化物	2,3,7,8-TeCDD 1,3,6,8-TeCDD 1,3,7,9-TeCDD TeCDDの総和	¹³ C-2,3,7,8-TeCDD	
五塩化物	1,2,3,7,8-PeCDD PeCDDの総和	¹³ C-1,2,3,7,8-PeCDD	
六塩化物	1,2,3,4,7,8-HxCDD 1,2,3,6,7,8-HxCDD 1,2,3,7,8,9-HxCDD HxCDDの総和	¹³ C-1,2,3,4,7,8-HxCDD ¹³ C-1,2,3,6,7,8-HxCDD ¹³ C-1,2,3,7,8,9-HxCDD 上記3異性体の平均	¹³ C-1,3,6,8-TeCDF
七塩化物	1,2,3,4,6,7,8-HpCDD HpCDDの総和	¹³ C-1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	
八塩化物	1,2,3,4,6,7,8,9-OCDD	¹³ C-1,2,3,4,6,7,8,9-OCDD	
	PCDFs	クリーンアップスパイク	シリンジスパイク
四塩化物	2,3,7,8-TeCDF 1,2,7,8-TeCDF TeCDFの総和	¹³ C-2,3,7,8-TeCDF	
五塩化物	1,2,3,7,8-PeCDF 2,3,4,7,8-PeCDF PeCDFの総和	¹³ C-1,2,3,7,8-PeCDF ¹³ C-2,3,4,7,8-PeCDF 上記2異性体の平均	
六塩化物	1,2,3,4,7,8-HxCDF 1,2,3,6,7,8-HxCDF 1,2,3,7,8,9-HxCDF 2,3,4,6,7,8-HxCDF HxCDFの総和	¹³ C-1,2,3,4,7,8-HxCDF ¹³ C-1,2,3,6,7,8-HxCDF ¹³ C-1,2,3,7,8,9-HxCDF ¹³ C-2,3,4,6,7,8-HxCDF 上記4異性体の平均	¹³ C-1,3,6,8-TeCDF
七塩化物	1,2,3,4,6,7,8-HpCDF 1,2,3,4,7,8,9-HpCDF HpCDFの総和	¹³ C-1,2,3,4,6,7,8-HpCDF ¹³ C-1,2,3,4,7,8,9-HpCDF 上記2異性体の平均	
八塩化物	1,2,3,4,6,7,8,9-OCDF	¹³ C-1,2,3,4,6,7,8,9-OCDF	
	コプラナーPCBs	クリーンアップスパイク	シリンジスパイク
ノンオルトPCBs異性体	3,3',4,4'-TeCB (#77) 3,4,4',5-TeCB (#81) 3,3',4,4',5-PeCB (#126) 3,3',4,4',5,5'-HxCB (#169)		
モノオルトPCBs異性体	2',3,4,4',5-PeCB (#123) 2,3',4,4',5-PeCB (#118) 2,3,3',4,4'-PeCB (#105) 2,3,4,4',5-PeCB (#114) 2,3',4,4',5,5'-HxCB (#167) 2,3,3',4,4',5-HxCB (#156) 2,3,3',4,4',5'-HxCB (#157) 2,3,3',4,4',5,5'-HpCB (#189)	各異性体の ¹³ C化合物	¹³ C-2,3',4',5-TeCB

鉛-210濃度とした。過剰鉛-210濃度の対数と積算重量深度のプロットの傾きから平均重量堆積速度を計算し、各層の推定堆積年代を求めた(松本, 1986)。

(2) POPs分析及び濃度測定

日本におけるPOPsの使用時期はほとんどが1940年代以降である(環境省環境保健部, 2002)。POPs分析を行う試料として各層のコアサンプルより,(1)の方法による推定堆積年代が1940年前後の層から表層までを選択した。選択した試料数は, TP-1 ~ TP-8 について合計58試料であった。これらと表層堆積物のみを採取した5点で得られた5つの試料との合計63試料についてPOPs分析を行った。

現在POPs条約に指定されているポリ塩化ジベンゾ-パラ-ジオキシン(PCDDs), ポリ塩化ジベンゾフラン(PCDFs), ポリ塩化ピフェニル

第5表 ダイオキシン類の測定機器及び測定条件
Table 5. HRGC/HRMS operation conditions for Dioxins

ガスクロマトグラフ (6890 series GC system, Hewlett Packard社製)			
試料注入口温度: 280~300°C			
試料注入方法: スプリットレス (6890 series injector 使用, Hewlett Packard社製)			
試料注入量: 1.5 µl			
カラム恒温槽温度:			
TeCDDs~OCDD, TeCDFs~OCDF;			
130°C(1 min.)-(15°C/min.)->210°C-(2.5°C/min.)->320°C(hold)			
Co-PCBs:			
130°C(1 min.)-(20°C/min.)->220°C-(5°C/min.)->320°C(hold)			
分離カラム: TeCDDs~OCDD, TeCDFs~OCDF; 溶融シリカキャピラリーカラム, BPX5(SGE社製)			
PeCDFs, HxCDFs; 溶融シリカキャピラリーカラム, RH-17(INVENTX社製)			
Co-PCBs; 溶融シリカキャピラリーカラム, HT8(SGE社製)			
質量分析計 (Micromass社製, AutoSpecUltima)			
測定方法: SIM			
インターフェース温度: 300°C			
イオン源温度: 320°C			
トラップカレント: 500 µA			
エレクトロンエネルギー: 30~40eV			
分解能: 10,000以上			
加速電圧: 約8,000V			
質量数補正: ロックマス方式 (PFK使用)			
測定質量数			
PCDDs	TeCDDs	319.8965, 321.8936	¹³ C-TeCDDs 331.9368, 333.9339
	PeCDDs	353.8576, 355.8546	¹³ C-PeCDDs 367.8949, 369.8919
	HxCDDs	389.8157, 391.8127	¹³ C-HxCDDs 401.8559, 403.8530
	HpCDDs	423.7766, 425.7737	¹³ C-HpCDDs 435.8169, 437.8140
	OCDD	457.7377, 459.7348	¹³ C-OCDD 469.7779, 471.7550
PCDFs	TeCDFs	303.9016, 305.8987	¹³ C-TeCDFs 315.9419, 317.9389
	PeCDFs	339.8597, 341.8568	¹³ C-PeCDFs 351.9000, 353.8970
	HxCDFs	373.8207, 375.8178	¹³ C-HxCDFs 385.8610, 387.8580
	HpCDFs	407.7818, 409.7789	¹³ C-HpCDFs 419.8220, 421.8191
	OCDF	441.7428, 443.7399	¹³ C-OCDF 453.7830, 455.7801
Co-PCBs	TeCBs	289.9224, 291.9194	¹³ C-TeCBs 301.9626, 303.9597
	PeCBs	325.8804, 327.8775	¹³ C-PeCBs 337.9207, 339.9177
	HxCBs	359.8415, 361.8385	¹³ C-HxCBs 371.8817, 373.8788
	HpCBs	393.8025, 395.7995	¹³ C-HpCBs 405.8428, 407.8398

(PCB), アルドリン, ディルドリン, エンドリン, トキサフェン, マイレックス, クロルデン, DDT, ヘプタクロル, ヘキサクロロベンゼン(HCB)の全12物質と, 将来POPsとして条約に指定される可能性の高いヘキサクロシクロヘキサン(HCH)を分析した。これらのうち一部の物質については異性体, 分解・代謝物についても分析を行った。測定した全成分を第3表に, そのうちダイオキシン類について詳細に示したものを第4表に示す。

ダイオキシン類の分析については, 文献(環境庁水質保全局水質管理課, 2000)に準じて行った。乾燥した試料に¹³Cラベル化した内標準物質をクリーンアップスパイクとして添加し, トルエンで16時間以上ソックスレー抽出を行った。抽出液を硫酸処理, 多層シリカゲルカラム処理, 及び活性炭埋蔵シリカゲルカラム処理により精製・分離した。得られた試料溶液を濃縮定容後, ¹³Cラベル化した内標準物質をシリンジスパイクとして添加し, 高分解能ガスクロマトグラフィー/高分解能質量分析計(HRGC/HRMS)による測定を行った。測定機器及び測定条件の詳細を第5表に示す。

PCB類, HCH類, アルドリン, ディルドリン,

エンドリン, DDT 類, HCB, ヘプタクロル類, クロルデン類及びマイレックスの分析については一斉処理法で前処理を行った。風乾した試料に ¹³C または重水素ラベル化した内標準物質をクリーンアップスパイクとして添加し, トルエンで 16 ~ 24 時間ソックスレー抽出を行った。溶質を濃縮後ヘキサンに転溶した。濃縮・脱水後した溶液をあらかじめ活性化したフロリジルカラムに添加した。夾雑物質をヘキサンで溶出除去後, 目的成分を 15% ジエチルエーテル含有ヘキサンで溶出した。溶質をアセトンに転溶, 濃縮後, GPC (Gel Permeation Chromatography) カラム (PEA-2000) により, 5% シクロヘキサン含有アセトン移動層として精製・分離した。得られた試料溶液を濃縮定容後, ¹³C ラベル化した内標準物質をシリンジスパイクとして添加し, HRGC/HRMS による測定を行った。測定機器及び測定条件の詳細を第 6 表に示す。

トキサフェンについては, 遠心分離によって上澄みを除去した湿泥に, クリーンアップスパイクとして ¹³C ラベル化した trans- クロルデンを添加し, ジクロロメタンで 16 時間ソックスレー抽出を行った。溶質をヘキサンに転溶後硫酸処理を行い, 溶液を脱水・濃縮した。5% 含水シリカゲルクロマトグラフィーにより, 夾雑物質をヘキサンで溶出除去後, 5% ジエチルエーテル / ヘキサンで目的成分を溶出した。溶出液を濃縮後, 活性炭カートリッジ (supelco Envi-carb 250mg) に添加し, ヘキサン 10ml で溶出した。得られた試料溶液を濃縮定容後, シリンジスパイクとして ¹³C-2, 2', 3, 3', 4, 4', 5, 5'-O₂CCB (#194) を添加し, 負イオン化学イオン化法を使用したガスクロマトグラフィー / 質量分析計 (GC/NCI-MS) による SIM 測定を行った。測定機器及び測定条件の詳細を第 7 表に示す。

各物質の回収率の計算に使用したクリーンアップスパイク及びシリンジスパイクを第 3 表, 第 4 表に併記する。

第 6 表 PCB 類, HCH 類, アルドリン, ディルドリン, エンドリン, DDT 類, HCB, ヘプタクロル類, クロルデン類及びマイレックスの測定機器及び測定条件
Table 6. HRGC/HRMS operation conditions for PCBs, HCHs, Drins (Aldrin, Dieldrin, Endrin), DDTs, HCBs, Heptachlors, Chlordanes, and Mirex

ガスクロマトグラフ (6890 series GC system, Hewlett Packard 社製)			
試料注入口温度: 300°C			
試料注入方法: スプリットレス (6890 series injector 使用, Hewlett Packard 社製)			
試料注入量: 1.5 μl			
カラム恒温槽温度:			
PCBs ;			
130°C(1 min.)→(15°C/min.)→180°C→(3.0°C/min.)→230°C→(10°C/min.)→290°C(hold)			
POPs ;			
130°C(1 min.)→(15°C/min.)→180°C→(4.0°C/min.)→245°C→(15°C/min.)→310°C(hold)			
分離カラム: PCBs ; 溶融シリカヒドリックカラム, HT8-PCBS(GE 社製)			
POPs ; 溶融シリカヒドリックカラム, RH-17(INVENTX 社製)			
質量分析計 (Micromass 社製, AutoSpec-Ultima)			
測定方法: SIM			
インターフェース温度: 280°C			
イオン源温度: 310°C			
トラップカレント: 500 μA			
電子エネルギー: 30~40eV			
分解能: 10,000以上			
加速電圧: 約8,000V			
質量数補正: ロックマス方式 (PFK使用)			
測定質量数			
PCBs	MoCBs	188.0393, 190.0363	¹³ C-MoCBs 200.0795, 202.0766
	DiCBs	222.0003, 223.9974	¹³ C-DiCBs 234.0406, 236.0376
	TriCBs	255.9613, 257.9584	¹³ C-TriCBs 269.9886, 268.0016
	TeCBs	291.9194, 289.9224	¹³ C-TeCBs 303.9597, 301.9626
	PeCBs	325.8804, 327.8775	¹³ C-PeCBs 337.9207, 339.9178
	HxCBs	359.8415, 361.8385	¹³ C-HxCBs 371.8817, 373.8788
	HpCBs	393.8025, 395.7995	¹³ C-HpCBs 405.8427, 407.8398
	O ₂ CBs	429.7606, 427.7635	¹³ C-O ₂ CBs 441.8008, 439.8038
	NoCBs	463.7216, 461.7245	¹³ C-NoCBs 475.7619, 473.7648
	DeCB	479.6829, 499.6797	¹³ C-DeCB 509.7229, 511.7199
POPs	HCHs	218.9116, 216.9145	¹³ C-HCHs 224.9317, 222.9347
	Drins	262.8570, 264.8540	¹³ C-Drins 269.8805, 271.8775
	DDE	246.0003, 247.9974	¹³ C-DDE 258.0406, 249.0455
	DDD	235.0081, 237.0052	¹³ C-DDD 243.0583, 245.0554
	HCB	283.8102, 285.8072	¹³ C-HCB 289.8303, 291.8274
	Heptachlor	271.8102, 273.8072	¹³ C-Heptachlor 276.8269, 278.8240
	Heptachlor epoxide	352.8442, 354.8413	¹³ C-Heptachlor epoxide 362.8778, 364.8748
	Chlordane	372.8260, 374.8230	¹³ C-Chlordane 382.8595, 384.8566
	oxy-chlordane	386.8052, 388.8023	¹³ C-oxychlordane 396.8388, 398.8358
	Nonachlor	408.7840, 406.7870	¹³ C-Nonachlor 418.8176, 416.8205
	Mirex	271.8102, 273.8072	¹³ C-Mirex 276.8269, 278.8240

第 7 表 トキサフェンの測定機器及び測定条件
Table 7. HRGC/NCI-MS operation conditions for Toxaphenes

ガスクロマトグラフ (6890 series GC system, Hewlett Packard 社製)			
試料注入口温度: 220°C			
試料注入方法: スプリットレス (6890 series injector 使用, Hewlett Packard 社製)			
カラム恒温槽温度:			
100°C(1 min.)→(20°C/min.)→200°C→(2.0°C/min.)→280°C(hold)			
分離カラム: 溶融シリカヒドリックカラム, BPX-DXN(SGE 社製)			
質量分析計 (GCmate, 日本電子社製)			
測定方法: SIM			
イオン源温度: 180°C			
イオン化ポテンシャル: 200eV			
測定質量数			
8塩素	378.85, 376.86	¹³ C-Chlordane	200.0795, 202.0766
9塩素	412.82, 410.82, 376.86, 378.85		

3. 結果

3-1. 年代測定結果

TP-1 から TP-8 について, 鉛-210 法により求められた平均重量堆積速度及び平均堆積速度を第 8 表に示す。第 2 図に TP-1 から TP-8 の各点における, 積算重量深度に対する過剰鉛-210 濃度(対数)のプロットを, 第 3 図に含水率及び強熱減量の深度別プロットを示す。TP-1, TP-2, TP-4, TP-5

第 8 表 鉛 210 年代測定により求めた推定堆積速度
Table 8. Average weight sedimentation rate and average sedimentation rate calculated by ²¹⁰Pb dating method

	TP-1	TP-2	TP-3	TP-4	TP-5	TP-6	TP-7	TP-8
平均堆積速度 :0-5cmの条件 (cm/年)	0.69	0.469	1.13	1.18	0.859	1.01	0.814	0.444
平均重量堆積速度 (g/cm ² /年)	0.146	0.148	0.329	0.199	0.174	0.286	0.215	0.183

及び TP-8 のコアにおける過剰鉛-210 濃度等の深度方向の変化は、ほぼ単調な減少であった。一方 TP-3, TP-6 及び TP-7 のコアにおける過剰鉛-210 濃度等の深度方向の変化には所々大きな増減が見られた。

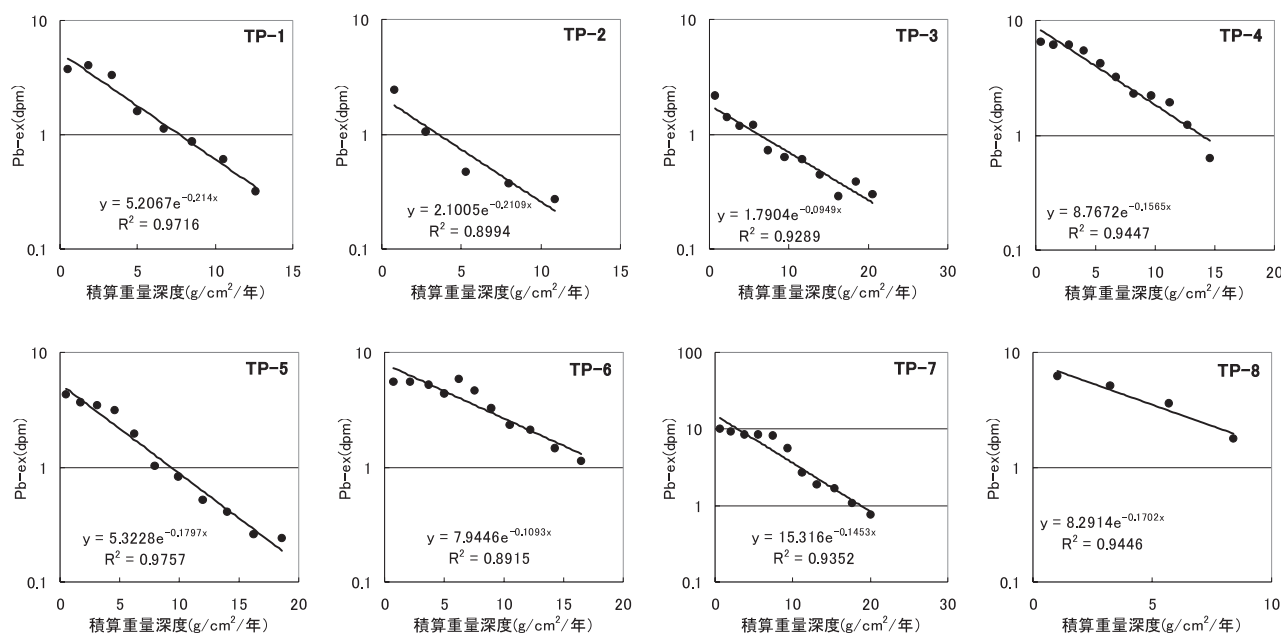
3 - 2 . POPs 分析結果

各点及び各層における POPs 濃度の詳細は海洋汚染調査報告 30 号(海上保安庁海洋情報部, 2004)に記載しているが、概要として、物質毎の総濃度の検出範囲を第 9 表にまとめる。分析を行った全試料において、ダイオキシン類毒性等量は環境省の定める底質の環境基準である 150pg-TEQ/g を超えなかった。同じく PCB 類濃度も昭和 50 年環境庁水質保全局通知で定められた底質の暫定除去

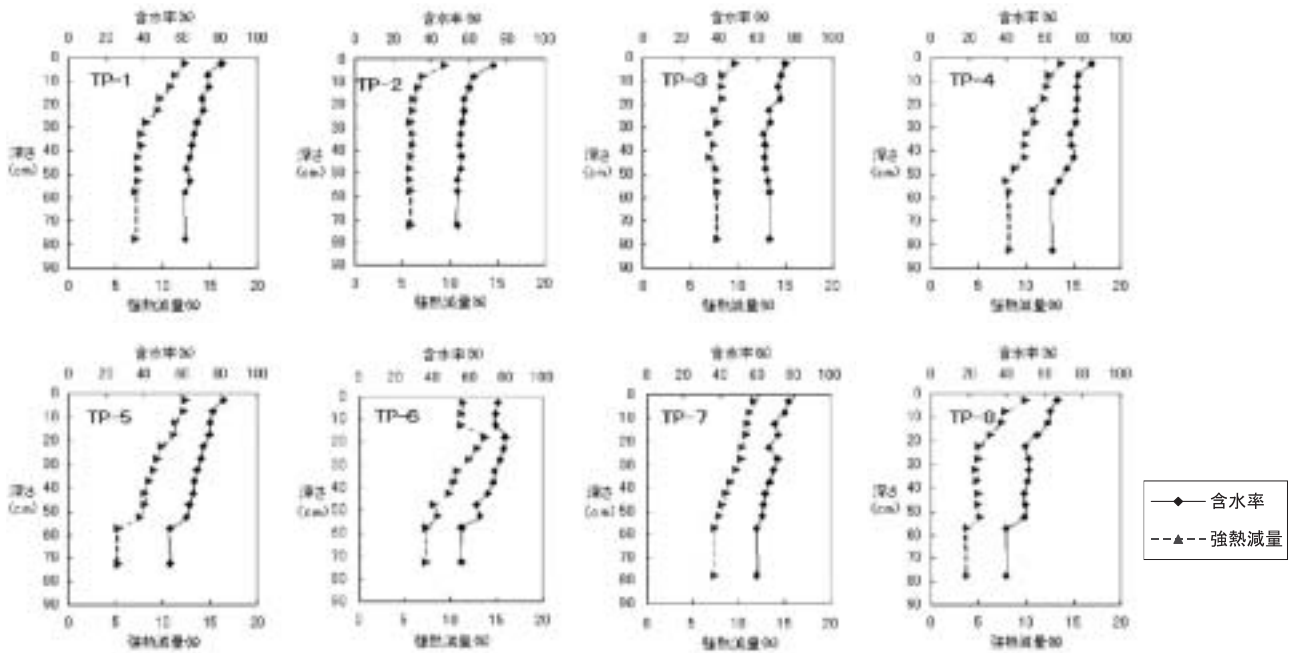
基準である、底質の乾燥重量当たり 10ppm を超えなかった。

そのほかの POPs の濃度の順位は層によって多少の違いはあるが、おおよそ DDT 類 > クロルデン類, HCB > HCH 類 > デILDリン > アルドリン > エンドリン, マイレックス > ヘプタクロル類であった。トキサフェン類はすべての層において、検出下限値が parlar26 について 0.03ng/g, parlar50 について 0.05ng/g, 及び parlar62 について 2ng/g において、検出されなかった。濃度の順位およびトキサフェン類の不検出については、POPs モニタリング調査結果(環境省, 2005)と同様の傾向であった。

既存の分析方法に沿って定量を行ったダイオキシン類については回収率、繰り返し精度ともに良好であったが、その他の POPs については開発途上の分析方法で定量を行ったため、データを扱う際には精度が十分でないものが含まれる点に注意する必要がある。アルドリンについては平均回収率が 29%と低く、同じくマイレックスについては 62%とやや低めであった。HCB については、15%の試料で回収率が 120%を超えた。繰り返し精度については試料によって 30%を超える場合



第 2 図 TP-1 から TP-8 における積算重量深度に対する過剰鉛 210 濃度
Figure 2. Plots of Excess ²¹⁰Pb vs. accumulation weight depth in TP-1 to TP-8



第3図 TP-1 から TP-8 における深度に対する，含水率、強熱減量のプロット。
Figure 3. Plots of water content and ignition loss vs. depth in TP-1 to TP-8

第9表 各 POPs 濃度の検出範囲 (異性体等合計濃度)
Table 9. Range of the concentration of POPs (sum of the components)

POPs名	検出範囲	単位
PCDDs	* 330-31,000	pg/g
PCDFs	* 74-6,600	pg/g
co-PCBs	* 94-21,000	pg/g
PCBs	* 1,600-350,000	pg/g
Aldrin	<0.2-290	pg/g
Dieldrin	5.0-800	pg/g
Endrin	<0.6-190	pg/g
Toxaphenes	* <2	ng/g
Mirex	<0.3-340	pg/g
Chlordanes	* 17-5,200	pg/g
HCB	90-1,900	pg/g
HCHs	* 18-2,500	pg/g
DDTs	* 220-26,000	pg/g
Hepthachlors	* <2-17	pg/g
tot-Dioxins	* 1.8-68	pg-TEQ/g
PCDDs+PCDFs	* 1.7-64	pg-TEQ/g
co-PCBs	* 0.062-9.3	pg-TEQ/g

*は異性体・代謝物等を含めた合計値

があった。今回の調査結果には厳密な議論を行うには精度として十分でないデータが含まれるものの、東京湾における POPs 汚染の概要を把握するためには利用できると考え、以下の解析を行った。

3 - 3 . 堆積物表層における POPs の分布

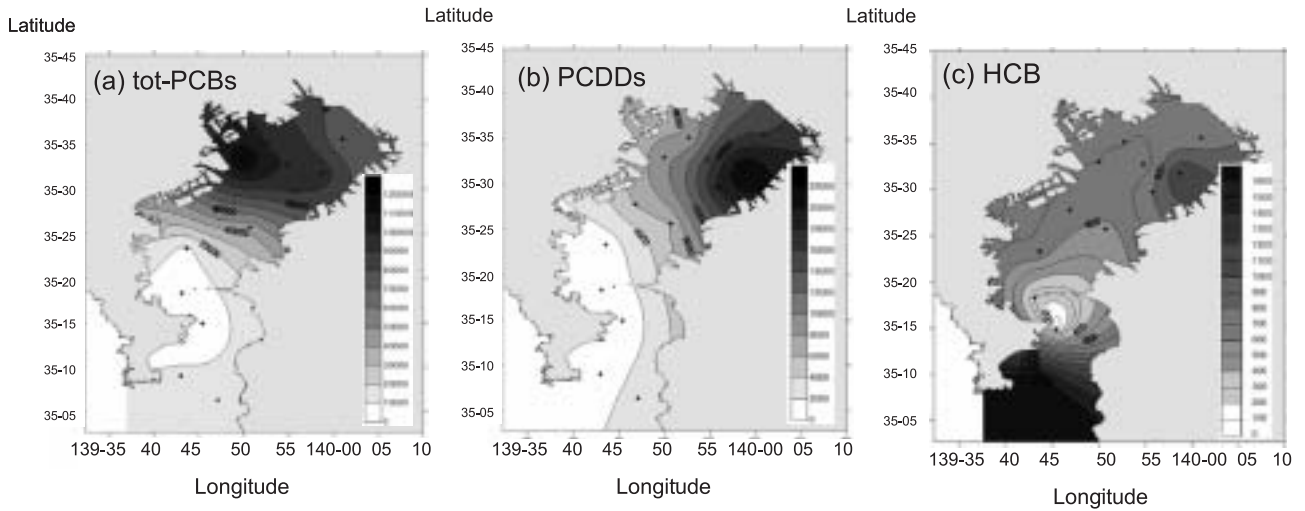
堆積物表層 (0-5cm) における各 POPs の総濃度について、調査点における濃度を用いて線形補完をし、湾内における POPs 濃度のコンター図を作成した。堆積物表層 (0-5cm) における総 PCB 類濃度の分布を第4図 a に、総 PCDDs 濃度の分布を第4図 b に、HCB 濃度の分布を第4図 c にそれぞれ示す。

ほとんどの POPs の表層濃度は、湾奥部、湾口部、中ノ瀬及び浦賀航路近辺の順に高い濃度を示した。HCB は湾口部の T-5 及び T-6 において湾奥部より高い濃度を示した。

湾奥の東西における各物質の濃度を比較したところ、PCB 類 (第4図 a) は西部で高い濃度を示した。PCB 類と同様コプラナー PCB 類、DDT 類、HCH 類、アルドリン、ディルドリン、マイレックス、クロルデン類及びヘプタクロル類は西部で高い濃度を示した。PCDDs (第4図 b)、PCDFs 及び HCB (第4図 c) は東部で高い濃度を示した。

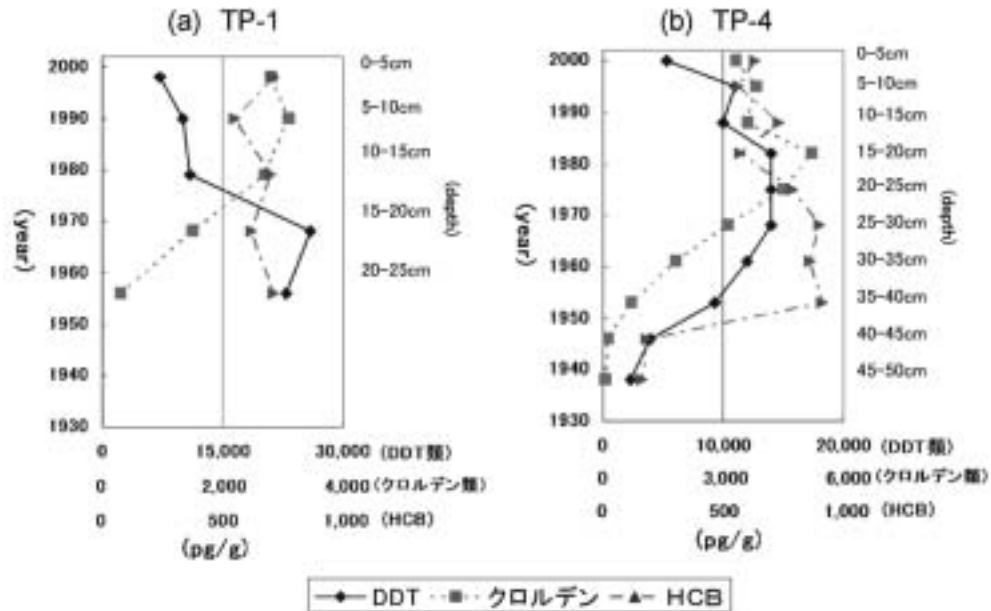
3 - 4 . コアにおける POPs の鉛直分布

TP-1 及び TP-4 における DDT 類及びクロルデ



第 4 図 堆積物表層 (0-5cm) における分布。(a) PCB 総濃度 (pg/g), (b) PCDDs 濃度 (pg/g) 及び (c) HCB 濃度 (pg/g)

Figure 4. Surface (0-5cm) distributions. (a) total-PCBs (pg/g), (b) PCDDs (pg/g) and HCB (pg/g)



第 5 図 DDT 類、クロルデン類及び HCB の鉛直分布。(a) TP-1 及び (b) TP-4

Figure 5. Vertical distribution of DDTs, Chlordanes, and HCB. (a)TP-1, (b)TP-4

ン類の総濃度の鉛直分布を第 5 図に示す。年代は、鉛-210 法から求めた推定堆積年代を用いて記述する。

DDT 類は 1950 年代以降に濃度が大きく上昇し、1970 年代をピークに表層に向かって減少傾向を示している。DDT 類と同様に、PCDDs、PCDFs、コプラナー PCB 類、PCB 類、アルドリリン、ディルドリン、エンドリン、HCH 類及びマイレックスは 1970 年代をピークとする鉛直分布を

示した。

クロルデン類は DDT 類より後の 1980 年代以降に濃度が上昇し、表層に向かって多少減少傾向が見られるが、表層においても比較的高い濃度を維持している。ヘプタクロル類はクロルデン類と類似した鉛直分布を示しており、表層においても比較的高い濃度を示している。

HCB の鉛直分布は 1950 年代以降の濃度が大きく上昇する点では DDT 類と類似しているが、

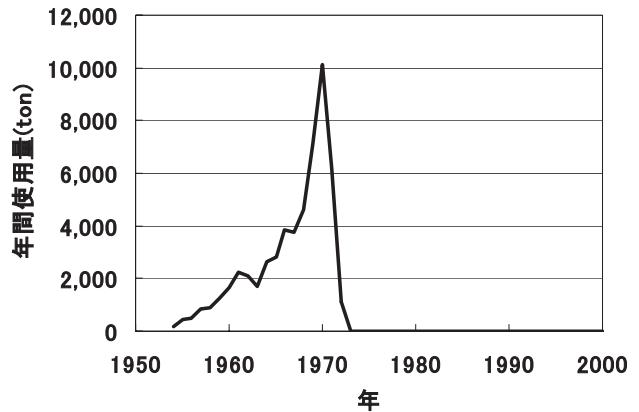
1970年代以降になってもあまり濃度の減少を見せず、表層においても比較的高い濃度を維持している。

4. 考察

4-1. コア試料における堆積層の状態と年代測定結果について

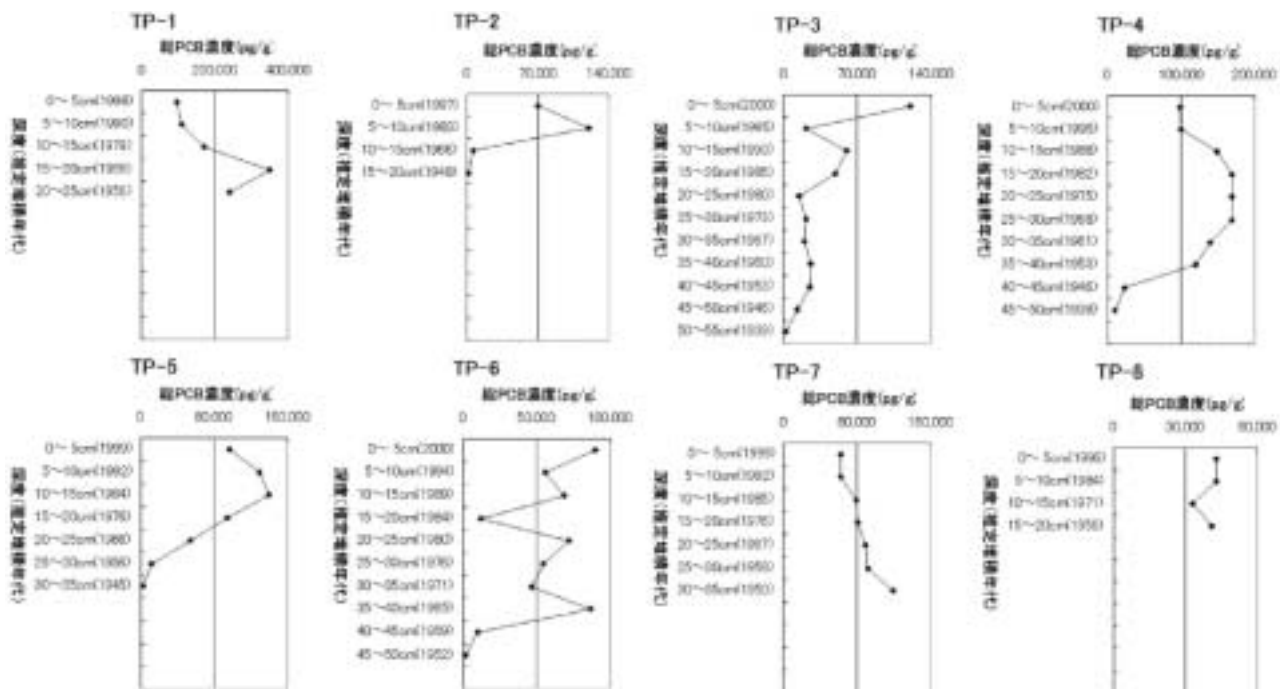
鉛-210年代測定法は、鉛-210及び堆積粒子の沈積速度が一定で、且つ堆積後の再移動がないことを前提としているので(松本, 1986)堆積層に乱れがある場合は、推定堆積年代が正しく求められない。放射性元素であるセシウム-137を同一試料で分析することによって鉛-210法による年代測定結果を検討する方法が知られているが、今回はセシウム-137の分析は行っていない。そこでPCB類濃度をモレキュラーマーカーとして堆積年代を推定する方法を用いた。この方法は、海底堆積物中においてPCB類濃度が1970年をピークとした顕著な増減を示すことを利用する方法である(真田他, 1999)。PCB類の国内にける使用量(第6

図)は1970年がピークであった(環境庁環境保健部, 2002)。第7図に、TP-1からTP-8の各点における、総PCB類濃度の鉛直変化と鉛-210法により求められた推定堆積年代の対応を示す。TP-1及びTP-4では、総PCB類濃度のピークの推定堆積年代は1970年付近であり、PCB類使用量のピークと年代が一致していた。TP-1及びTP-4につい



第6図 国内におけるPCB使用量。出典：環境保健レポートNo.14, (財)日本公衆衛生協会(1972)及び磯野直秀, 化学物質と人間, 中公新書(1985)。(環境省環境保健部, 2002)

Figure 6. Amount of PCBs use in Japan, from references.



第7図 総PCB類濃度の鉛直分布。各層の推定堆積年代は鉛-210法により求められた値

Figure 7. Plot of vertical total-PCB concentration. Accumulation years are estimated from sedimentation late.

では、鉛-210 法から求めた推定堆積年代を用いて POPs の年代変化を考察することは妥当であると考えられる。TP-2 及び TP-5 ではピークが 1980 年代であり、PCB 類の禁止から 10 年以上後にあたる。TP-3 及び TP-6 では複数のピークがあり、TP-7 及び TP-8 ではピークが見られなかった。これらのコアにおける鉛直分布から年代変化を考察する際には、コアにおける層の乱れについて十分に検討を行う必要がある。

4 - 2 . 湾奥部における POPs の表層分布と POPs の負荷経路の関係

POPs のほとんどは農薬や工業製品として陸上において使用されたものであるため、POPs が海へ負荷される経路としては、河川経路が主であると考えられる。東京湾に流入する河川のうち、一級河川の河口は湾奥西部に集中していることから（第 1 図）、河川経路で東京湾に到達した POPs が沈降・堆積したため、多くの POPs が湾奥西部において比較的高い濃度を示している（第 4 図 a）と考えられる。

一方、PCDDs、PCDFs 及び HCB は他のほとんどの POPs と異なり、湾奥東部で高い値を示す分布となっている（第 4 図 b）ことから、湾奥西部の河川経路とは異なる負荷経路を考える必要がある。

湾奥東部に位置する市原港（第 1 図）において、平成 12 年に千葉県市原市の調査により環境基準を超える毒性等量のダイオキシン類が検出されている。市原市等の調査においては、汚染原因についてはまだ確定されていないが、その異性体組成において高塩素化 PCDDs 及び PCDFs の占める割合が高いことから、農薬のペンタクロロフェノール（PCP）由来の汚染であることが疑われている（吉沢他，2003；2004）。PCP には不純物として PCDDs、PCDFs 及び HCB が含まれていたことが知られている（益永他，2002；酒井他，2001）。

各表層試料のダイオキシン類合計毒性等量に対して、高（7 及び 8）塩素化 PCDDs 及び PCDFs が占める割合を第 10 表に示す。湾奥東部に位置

第 10 表 表層試料のダイオキシン類毒性等量に対して、高塩素（7 または 8）化 PCDDs 及び PCDFs が占める割合

Table 10. TEQ percentage of 7or8PCDDs and PCDFs in total TEQ of Dioxins.

測点	高塩素化PCDDsとPCDFs物が毒性等量合計値に占める割合
TP-1	19%
TP-2	33%
TP-3	22%
TP-4	25%
TP-5	36%
TP-6	32%
TP-7	18%
TP-8	22%
T-2	19%
T-3	19%
T-4	15%
T-5	16%
T-6	13%

する TP-2、TP-5 及び TP-6 において、高塩素化 PCDDs 及び PCDFs の割合が大きく、市原港において検出されたダイオキシン類の組成と特徴が類似している。本研究より得られたダイオキシン類の分布と市原港のダイオキシン類汚染の問題との関連について明らかにするためには、検出された試料中ダイオキシン類の詳細成分を解析し、汚染原因を解明すること、東京湾における汚染物質の移動について更に研究を進めることが必要である。

4 - 3 . 表層における POPs 分布と底質粒度の関係について

東京湾の湾奥に負荷された POPs は、沈降・堆積により海水中より徐々に取り除かれていくのであれば、湾奥ほど高濃度で湾口に向かって濃度が小さくなることが予想できる。しかし、いずれの POPs についても湾口である T-5 及び T-6 において、より湾の奥に位置する T-2 から T-4 よりも高い濃度を示した。これには T-2 から T-4 は浦賀水道にあたり、海水の流れが比較的速く、堆積物が留まりにくい（松田，1993）ことが関係すると考えられる。第 11 表に、TP-3、TP-7、T-2 から T-6 表層の 0-1cm における粒度組成分析結果（海上保安庁海洋情報部，2004）を示す。汚染物質は堆積

第 11 表 TP-3, TP-7, T-2 から T-6 の表層 0-1cm における粒度分析結果

Table 11. Results of grain-size analysis of surface 0-1cm in TP-3, TP-7 and T-2 to T-6

調査点	底質	粒 度 組 成 (%)					中央粒径 μm
		礫 (2000 μm<)	粗・中砂 (250~2000 μm)	細砂 (62.5~250 μm)	シルト (2~62.5 μm)	粘土 (<2 μm)	
TP-3(T-1)	M	0.0	0.5	1.2	55.8	42.5	3
TP-7(T-A)	M	0.0	1.1	0.9	66.1	31.9	5
T-2	S,M	12.7	18.7	36.2	20.4	12.0	114
T-3	S,M	0.6	10.5	54.7	20.0	14.2	118
T-4	S	13.0	59.1	16.4	8.6	2.9	402
T-5	M	0.0	0.2	6.6	69.2	24.0	7
T-6	M	0.0	0.2	3.8	71.4	24.6	7

底質記号 M:泥 S:砂

物表面に付着して堆積するので、一般に粒度が小さいところで高濃度を示す傾向がある。日向野他(1975)は、底質の油分汚染について粒度組成の影響を補正するために、試料が 62.5 μm 以下のシルト・粘土フラクション 100% であると考えたときの値で汚染状態を示す方法を用いている。日向野他の方法にならい、次式により補正を行った。

$$\text{粒度補正濃度} = (\text{POPs 分析濃度}) / (\text{含泥率}(\%)) \times 100$$

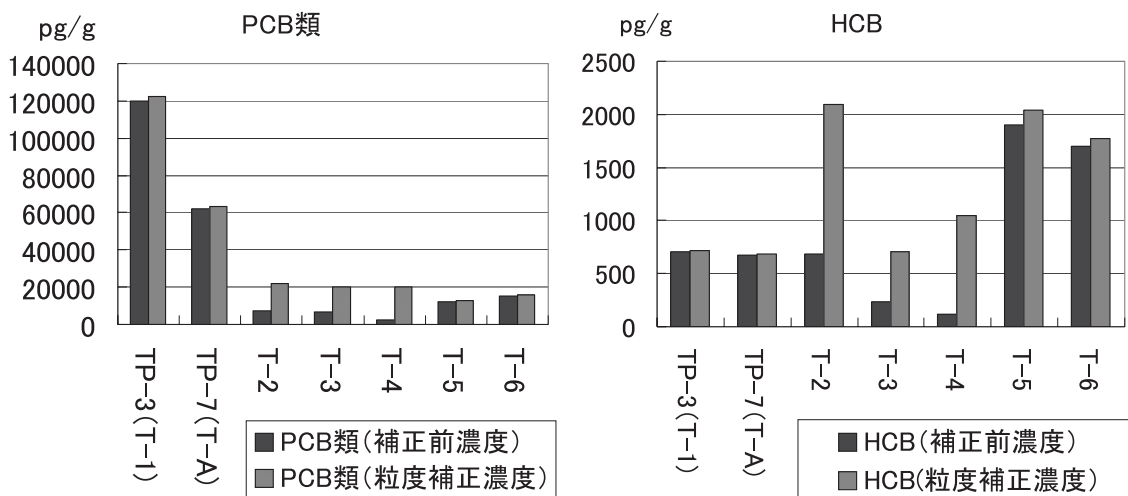
ここで、含泥率には第 11 表に示したシルトと粘土の合計値を用いた。計算に用いた含泥率は表層 0-1cm の堆積物試料を分析した結果であり、POPs 濃度の分析(0-5cm)とは測定深度が一致しないが、準ずる値として使用した。

PCB 及び HCB について、粒度補正前と後の濃度比較を第 8 図に示す。いずれの POPs について

も粒度補正濃度では、T-2 から T-6 における値は同程度であった。中ノ瀬から浦賀水道航路付近(T-2 から T-4)と湾口(T-5 及び T-6)における POPs 濃度の差は海底堆積物の粒度の違いによってある程度説明できると考えられる。HCB については、表層における濃度が湾口(T-5 及び T-6)で最も高い濃度を示していたが(第 4 図 c)、この差については粒度の違いによっては説明できない(第 8 図)。HCB については湾奥以外における負荷があったと考えられる。

4 - 4 . POPs 汚染の鉛直分布と POPs 使用時期の関係

DDT 類, PCDDs, PCDFs, PCB 類, アルドリン, ディルドリン, エンドリン, HCH 類については、TP-1 及び TP-4 のコアの分析から得られた鉛直分布(第 5 図)より、1970 頃をピークに濃度が減少する傾向がみられていた。DDT 類については 1971 年に農薬登録が失効し、1981 年に化審法の第一種特定化学物質に指定されている。環境中に残留する PCDDs, PCDFs については農薬のペンタクロロフェノール(PCP)及びクロロニトロフェン(CNP)の不純物が汚染由来の大半を占めるとされているが(Yao, et. al., 2000; 益永他, 2001), これらの農薬の使用時期はそれぞれ 1955-74 年及び 1965-94 年であり、後から製造された農



第 8 図 PCB 類及び HCB 濃度の粒度補正

Figure 8. Concentration correction of PCBs and HCB by grain size analysis

薬ほど PCDDs 及び PCDFs の含有濃度が減少していることが知られている(益永, 2002)。PCB 類については 1972 年に製造及び輸入が禁止されている。アルドリン, デルドリンについては 1975 年に, HCH 類については 1971 年に農薬の登録が失効している。これらの物質については, 物質の使用禁止が東京湾への負荷の削減に効果をあげていることを示していると考えられる。

一方クロルデン類及びヘプタクロル類は, TP-1 及び TP-4 のコアの分析から得られた鉛直分布より, 1980 年代以降も濃度の増加が続いていた(第 5 図)。クロルデン類については 1968 年に農薬としての登録は失効したが, その後もシロアリ駆除剤としての使用があったことが知られている。1970 年代終盤からのクロルデン輸入量は農薬登録時よりも増加しており, 1986 年に化審法第一種特定化学物質に指定されるまで使用が続いた(環境省環境保健部, 2002)。ヘプタクロルについてはクロルデンと同様の輸入・使用実績があったとされる(環境省環境保健部, 2002)。これらの点がクロルデン, ヘプタクロルが表層においても比較的高い濃度を維持している原因となっていると考えられる。これらの物質については表層において濃度が減少傾向を示していることから, 使用禁止の効果が出ていると考えられ, 今後濃度の減少が進むことが予測される。

HCB については上記 2 種の年代変化と異なり, TP-1 及び TP-4 のコアの分析から得られた鉛直分布より, 1950 年代に大きく濃度が上昇した後, 表層においても濃度の減少が見られていないのが特徴的であった(第 5 図)。HCB そのものは日本においては過去にも農薬の登録がされたことはないが, 農薬の PCP 等の合成原料として使われていた実績がある(環境省環境保健部, 2002; 酒井他, 2001)。このことが 1950 年代の濃度の大きな上昇に影響していると考えられる。HCB は農薬のペンタクロロニトロベンゼン(PCNB)やジメチル 2,3,5,6-テトラクロロテレフタレート(TCTP)農薬に不純物として含まれており(環境省環境保健部, 2002; 酒井他, 2001), これらの農薬は 1990

年代後半まで国内で出荷されていた。また, ゴミ焼却や塩素系有機溶媒の製造過程, 金属精錬といった工業過程の副産物として非意図的に生成されることも知られている(環境省環境保健部, 2002; 酒井他, 2001)。HCB は 1979 年に化審法で第一種特定化学物質に指定されているが, 今回の調査で HCB の堆積物中濃度が表層においても減少傾向が見られなかった。これは, 上記のように HCB 汚染には非意図的な生成及び排出の影響が大きいことによると考えられる。マイレックスについては国内における製造・輸入及び使用実績が無いとされているが(環境省環境保健部, 2002), 環境省による POPs モニタリングでも国内において検出がされている(環境省, 2005)。今回の調査においてマイレックスは PCB 類, DDT 類等と類似した表層分布及び鉛直分布を見せていることから, マイレックスについても, これら物質と類似した時期に類似した場所で使用されたことが推測される。

5. まとめ及び今後の展開

平成 14 年度に実施した東京湾の POPs 調査によるデータを用い, 各物質の総濃度について表層分布及び鉛直分布を図示することで, 物質毎の汚染分布の特徴がつかめた。

POPs の堆積物表層における濃度分布は, 湾奥, 湾口, 中ノ瀬から浦賀水道航路の順で高い濃度を示す傾向があった。湾奥部における東西方向の表面分布は PCB 類, DDT 類, HCH 類, アルドリン, デルドリン, マイレックス, クロルデン類, ヘプタクロル類は西部で, PCDDs, PCDFs 及び HCB は東部で高い濃度を示す傾向があった。これらの表層分布の特徴は, POPs の負荷源や, 海底堆積物の粒度など堆積環境が関係していると考えられる。

堆積物試料については, 生物活動による攪乱のほか東京湾では埋め立てや浚渫等の工事, 底引き網等の漁業活動が行われていることもあり, 攪乱

無く歴史を保存している堆積物のコア試料を得ることは大変難しい。コア試料について含水率、強熱減量、鉛-210 濃度、及び総 PCB 濃度の鉛直分布から堆積状態の検討を行った。8 本のコアサンプルのうち比較的堆積層に乱れないと判断された 2 本のコアにおける鉛直方向の POPs 濃度の分布から、POPs 濃度の年代変化が各 POPs の使用時期を反映している様子がとらえられた。

今回の報告では各 POPs の総濃度について分布を考察したが、各 POPs については異性体や分解・代謝物を含む多数の成分を分析している項目もある。POPs の異性体や代謝物の詳細な成分組成とその分布調査は、環境中における POPs の排出源や移動・蓄積・分解等の過程を知り、今後の POPs 対策を検討する上で重要な情報源となる。例えばダイオキシン類については、その詳細な成分濃度の調査結果を用いて汚染源の推定やその寄与率を計算した例が近年多く報告されている (Masunaga et. al., 2001 ; 2002)。今回の調査結果についても同様の解析を行うことで、今回得られたダイオキシン類の分布と市原港におけるダイオキシン類汚染問題とが関連する可能性についても新たな見解が得られると考えられる。

また、今回の報告で年代変化の考察に用いなかったコアについても、コアにおける堆積層の状態について十分な検討を行った上で考察を行うことで、東京湾堆積物における POPs の年代変化についてさらなる情報を得ることができると考えられる。

6. 謝辞

東京湾における POPs 調査を実施するに当たって、堆積物試料採取については測量船明洋及び拓洋の皆様が年代測定及び POPs 分析については国土環境 (株) 環境創造研究所にご協力頂きました事を感謝致します。

要約

海上保安庁海洋情報部は平成 14 年 (2002 年) に東京湾において POPs 調査を行った。海洋情報部所属の測量船により、東京湾の 13 点において海底堆積物を採取し、そのうち内湾部の 8 点ではコアサンプルを採取した。採取した試料は 13 種の POPs の分析を行い、コアサンプルは年代測定を行った。

堆積物表層では、ほとんどの POPs が湾奥部、湾口部、中ノ瀬及び浦賀航路近辺の順に高い濃度を示した。湾奥の東西における各物質の濃度を比較したところ、PCB 類等ほとんどの POPs は西部で高い濃度を示し、PCDDs、PCDFs 及び HCB は東部で高い濃度を示した。これらの表層分布の特徴は、POPs の負荷源や、海底堆積物の粒度など堆積環境が関係していると考えられる。

堆積物における鉛直方向の濃度分布から、POPs 濃度の年代変化を考察した。PCB 類等ほとんどの POPs は、1950 年代より濃度が大きく上昇し、1970 年にピークを示した後、現在まで減少を続けるという年代変化を示した。クロルデン類及びヘプタクロル類は 1980 年代にピークを示し、現在まで比較的高い濃度を維持する年代変化を示した。HCB は 1950 年代に大きく上昇し、表層においても比較的高い濃度を維持する年代変化を示した。これらの POPs 濃度の年代変化は POPs の使用及び排出時期を反映していると考えられる。

参考文献

- 海上保安庁海洋情報部 (2004), 海洋汚染調査報告第 30 号, 海上保安庁海洋情報部, 東京
- 環境省 (2005), 「平成 15 年度 POPs モニタリング結果 (暫定)」について, 報道発表資料, 2005 年 1 月 19 日
- 環境省 (2004), 化学物質環境汚染実態調査平成 15 年度版, 東京
- 環境省環境保健部 (2002), POPs 条約対象 12 物質の概要, POPs 対策検討会 (第 1 回) 資料, 東京, 2002 年 2 月 8 日
- 環境庁水質保全局編 (2000), 農薬等の環境残留実

- 態調査分析法, 東京
- 環境庁水質保全局水質管理課(2000), ダイオキシン類に係る底質調査測定マニュアル, 東京
- 環境庁水質保全局水質管理課(1998), 外因性内分泌攪乱化学物質調査暫定マニュアル(水質, 底質, 水生生物), 東京
- 環境庁水質保全局水質管理課(1988), 底質調査方法, 昭和63年9月8日付け環水管第127号
- 日向野良治, 田口広, 陶正史(1975), 底質の油汚染と粒度組成に関する考察, 水路部研究報告, 10, 45-50
- Masaaki Hosomi, Tomonori Matsuo, Sirou Dobashi, Sinji Katou, Hirohide Abe (2003), Survey of dioxins in Tokyo Bay bottom sediment, Marine Pollution Bulletin, 47, 68-73
- 益永茂樹, 姚元, 高田秀重, 桜井健郎, 中西準子(2001), 東京湾のダイオキシン汚染:組成と汚染源推定, 地球化学, 35-4, 159-168
- 益永茂樹, 農薬のダイオキシン不純物(2002), 廃棄物学会誌 13-5, 247-254
- Masunaga, S., Yao, Y., Ogura, I., Nakai, S., Kanai, Y., Yamamuro, M. and Nakanishi, J. (2002), Identifying sources and mass balance of dioxin pollution in Lake Shinji Basin, Japan. Environ. Sci. Technol. 35, 1967-1973
- 益永茂樹, 姚元, 高田秀重, 桜井健郎, 中西準子(2001), 東京湾のダイオキシン汚染:組成と汚染源推定, 地球化学, 35-4, 159-168
- Masunaga, S., Takasuga, T. and Nakanishi, J. (2001), Dioxin and dioxin like PCB impurities in some Japanese agrochemical formulations, Chemosphere, 44, 873-885
- 松田盤余(1993), 東京湾と周辺の沖積層, 東京湾の地形・地質と水, 貝塚爽平編, 76-107, 築地書館, 東京
- 松本英二(1986), 沿岸環境調査マニュアル〔底質・生物篇〕, 日本海洋学会編, 37-39, 恒星社厚生閣, 東京
- 酒井伸一・平井康宏・高月紘(2001), ヘキサクロロベンゼン(HCB)の環境排出とその発生源, 廃棄物学会誌, 12-6, 349-362
- 真田幸尚, 佐藤太, 熊田英峰, 高田秀重, 山本愛, 加藤義久, 上野隆(1999), 放射性核種および molecular marker による東京湾の堆積過程の解明, 地球化学, 33, 123-138
- 柴田康行, 高沢嘉一, 鈴木規之, 中野武, 福島実, 吉田佳督, 榎本康敬, 田辺信介, 森田昌敏(2004), 日本における POPs モニタリング モニタリング結果とその特徴, 第13回環境化学討論会講演要旨集, 62-63
- 高田秀重, 柳哲雄(2000), 東京湾堆積物中の環境ホルモン物質 - 過去50年間の歴史変遷, 沿岸海洋研究, 37(2), 97-106
- 竹田宜人, 葛西孝司, 飯村文成, 津久井公昭, 吉岡秀俊, 東野和雄, 佐々木裕子(2003), 東京湾堆積物中のダイオキシン類およびポリ塩化ビフェニルの分布について, 環境化学, 13-2, 397-407
- 柳哲雄, 橋本俊也: 東京湾における PCB の動態, 沿岸海洋研究(2000), 37(2), 107-109
- 吉沢正, 石渡康尊, 強口英行, 半野勝正, 仁平雅子, 鯉淵幸生, 依田彦太郎, 原雄(2004), 市原港底質ダイオキシン類汚染に関する調査 - 東京湾の概況調査 -, 第13回環境化学討論会講演要旨集, 564
- 吉沢正, 石渡康尊, 半野勝正, 依田彦太郎, 木村満男, 田中崇(2003): 千葉県市原港におけるダイオキシン類汚染調査 I - 平面分布調査, 全国環境研会誌, 28, 2, 105-112
- Yuan Yao, Hideshige Takada, Shigeki Masunaga, Junko Nakanishi (2000), PCDDs, PCDFs and co-PCBs in Tokyo Bay: Sources and Contribution, Organohalogen Compounds, 46, 491-494

転載等に関する問い合わせ先

〒104 0045
東京都中央区築地5丁目3番1号
海上保安庁海洋情報部技術・国際課海洋研究室
海洋情報部研究報告担当
電話 03 3541 4387 , F A X 03 3541 3870

平成17年3月25日発行

発行者	海上保安庁海洋情報部 東京都中央区築地5丁目3番1号 (郵便番号104 0045) 電話 03 3541 3811(代)
編集者	海洋情報部研究報告編集委員会 東京都中央区築地5丁目3番1号 (郵便番号104 0045) 電話 03 3541 4387
印刷所	新高速印刷株式会社 東京都港区新橋5 8 4 柴田ビル6F 郵便番号 105 0004 電話 03 3437 6365

本号掲載の著作物の無断転載・複製を禁ず

REPORT OF HYDROGRAPHIC AND OCEANOGRAPHIC RESEARCHES

No.41

March 2005

CONTENTS

- | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 . 日本列島とその周辺海域のブーゲー重力異常 (2004年版).....植田義夫 | 1 |
| Bouguer Gravity anomalies (ver. 2004) of Japanese Island Arcs and its adjacent seas | |
|Yoshio UEDA | |
| 2 . 海底地殻変動観測における局位置解析手法と精度の向上について | 27 |
| Inverse method and precision improvement for seafloorpositioning | |
|Tadashi ISHIKAWA and Masayuki FUJITA | |
| 3 . 東京湾海底堆積物中におけるPOPs (残留性有機汚染物質) 濃度分布の特徴について | 35 |
| (平成14年東京湾POPs調査結果より) | |
| 清水潤子・山尾 理・野坂琢磨・野口賢一・峯 正之 | |
| 松本敬三・大市一芳・堤 一尚・宮本哲司・池田善郎 | |
| Distributions of Sedimentary POPs (Persistent Organic Pollutants) in Tokyo Bay - Results from | |
| the Survey of POPs in Tokyo Bay in 2002. | |
|Junko SHIMIZU, Satoshi YAMAO, Takuma NOSAKA, Ken-ichi NOGUCHI, | |
| Masayuki MINE, Keizo MATSUMOTO, Kazuyoshi OICHI, | |
| Kazunao TSUTSUMI, Tetsuji MIYAMOTO, Yoshiro IKEDA | |

**JAPAN COAST GUARD
TOKYO, JAPAN**

Older issues: <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/>